

Эффективный и безопасный комплекс технологий освоения урановых месторождений скважинным подземным выщелачиванием в криолитозоне (Республика Бурятия)

Солодов Игорь Николаевич – д.г.-м.н.,
директор программ инновационного и
технологического развития
АО «Росатом Недра»

2025 г.

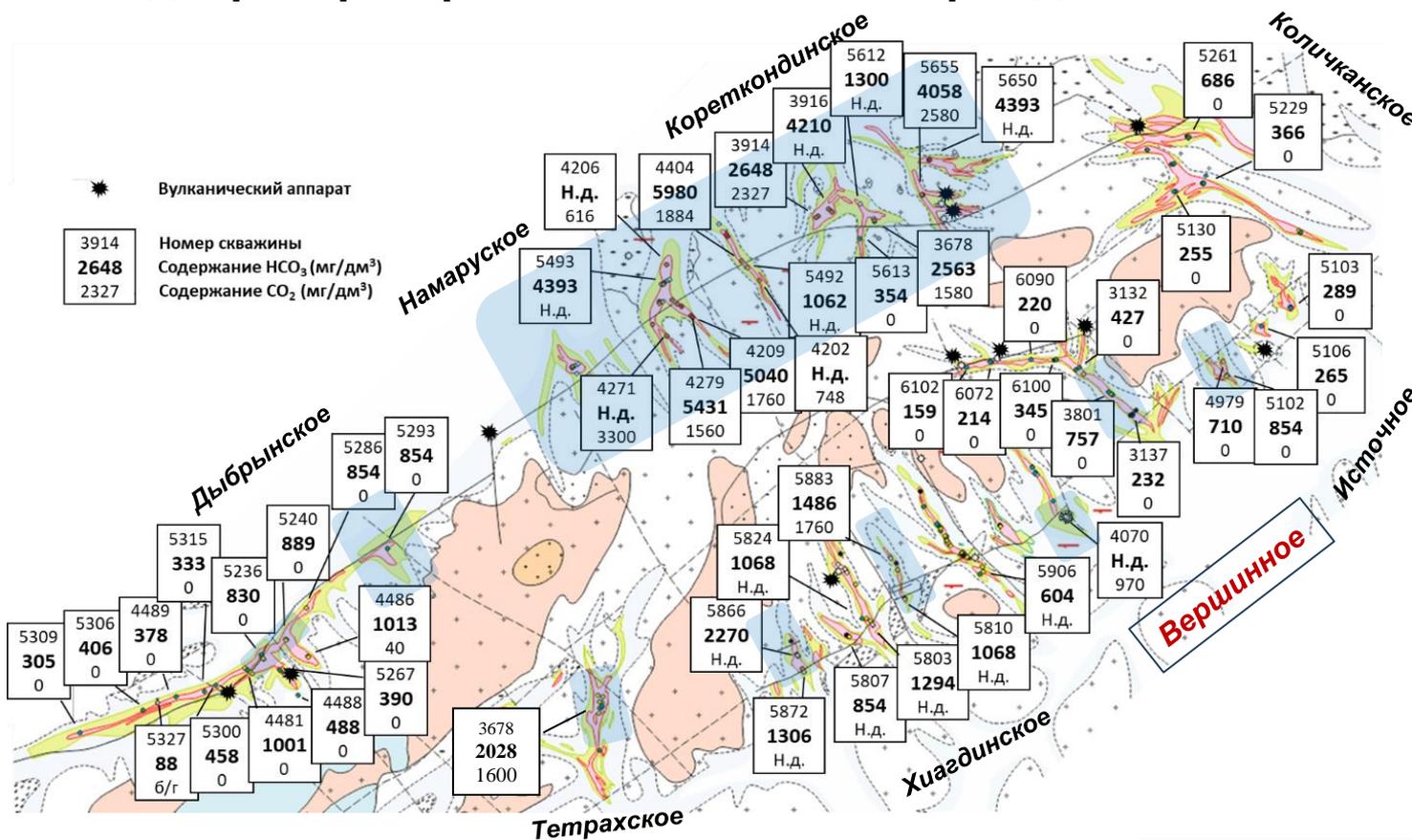


РОСАТОМ
НЕДРА

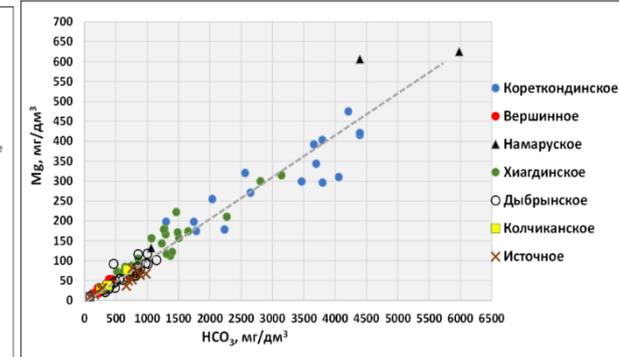
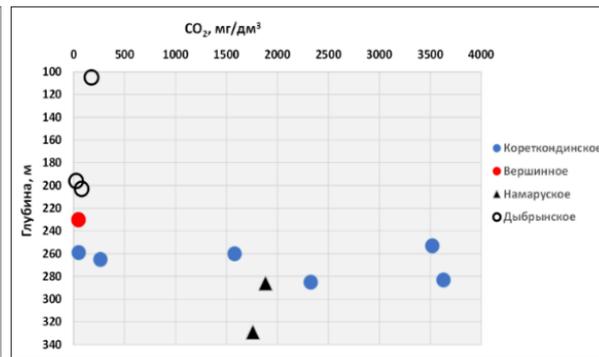
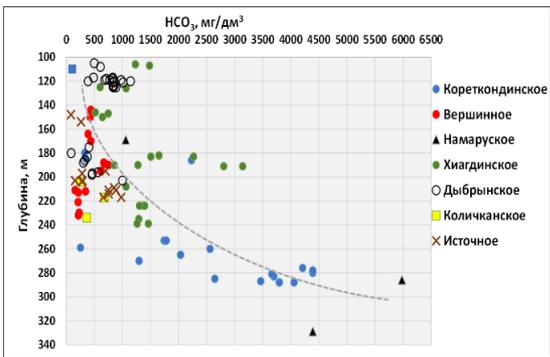
1. Обоснованы новые критерии поисков палеодолинных инфильтрационно- эксфильтрационных урановых месторождений витимского типа

- 1 Приуроченность рудоносных речных палеодолин к сводово-купольным геоструктурам растяжения и разуплотнения
- 2 Граниты баргузинского и витимканского комплексов – объемный источник урана с содержанием U $n \cdot 10^{-4} \%$
- 3 Палеодолины и овражно-балочная сеть врезанные в кристаллический фундамент на склонах поднятий
- 4 Миоценовые (N_{2-3}) делювиально-пролювиальные и аллювиальные терригенными отложениями с углефицированными растительными остатками в качестве концентратора урана, заполняющие палеодолины
- 5 Углекислые гидрокарбонатно-магниевые подземные воды с эпигенетическими восстановителями урана
- 6 Углеводороды нефтяного ряда в почвенном покрове
- 7 Осветленные и обеление миоценовых аллювиальных будущих рудоносных отложений

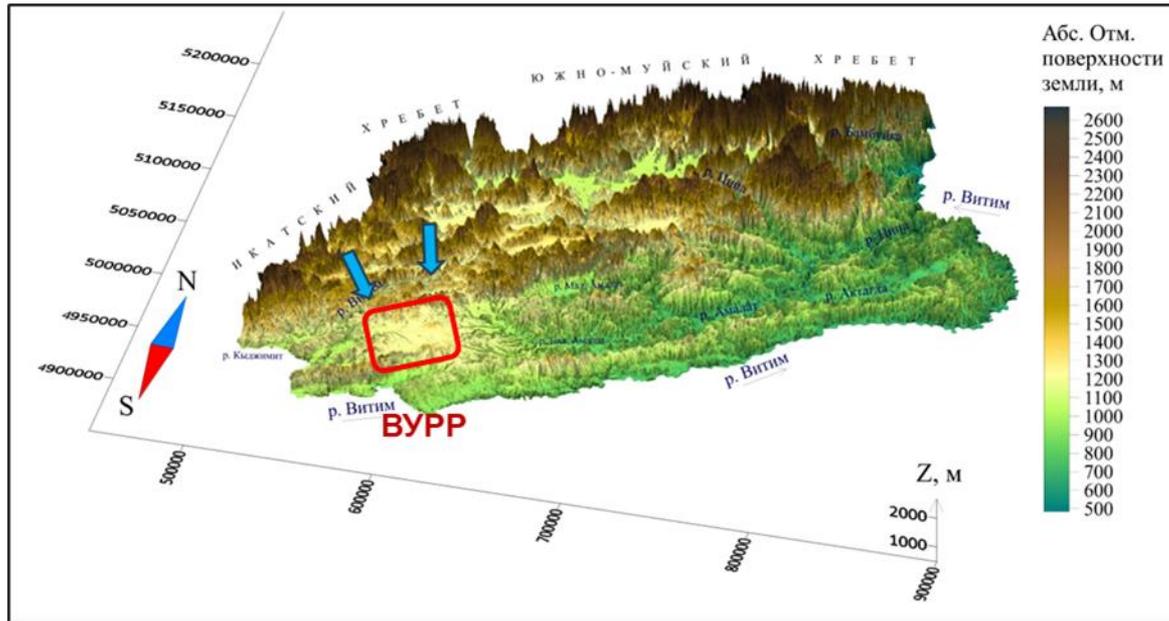
5. Углекислые гидрокарбонатные магниевые подземные воды распространены на всех месторождениях ХРП



1. Байсыханское поднятие – часть Забайкальской провинции холодных углекислых подземных вод
2. Содержание CO_2 и HCO_3 закономерно возрастают с увеличением глубины залегания подземных вод
3. Идеальная прямая зависимость Mg от HCO_3 – свидетельствует о восхождении из фундамента не только газовой, но и жидкой фазы

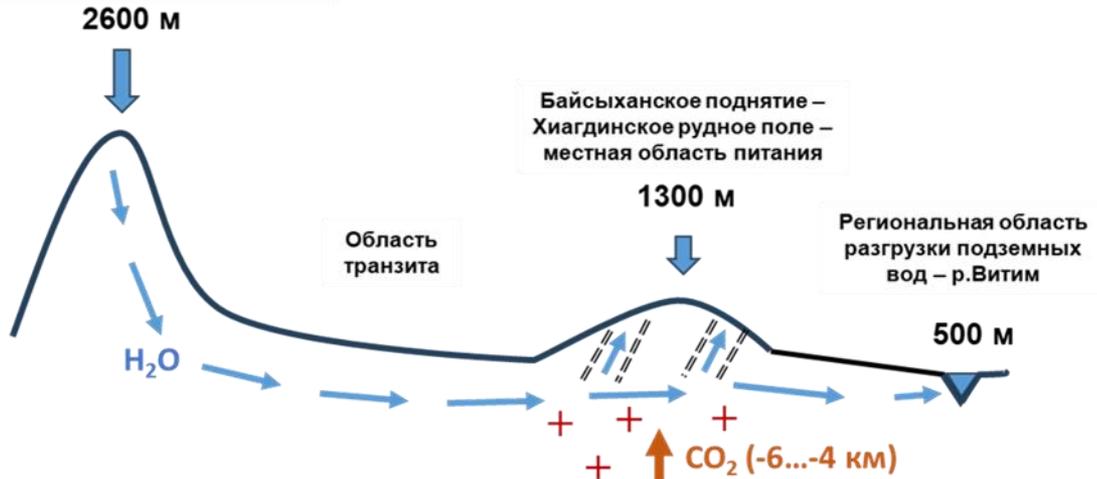


Модель эксфильтрации глубинных углекислых подземных вод и их разгрузки в рудоносные горизонты на месторождениях ХРП

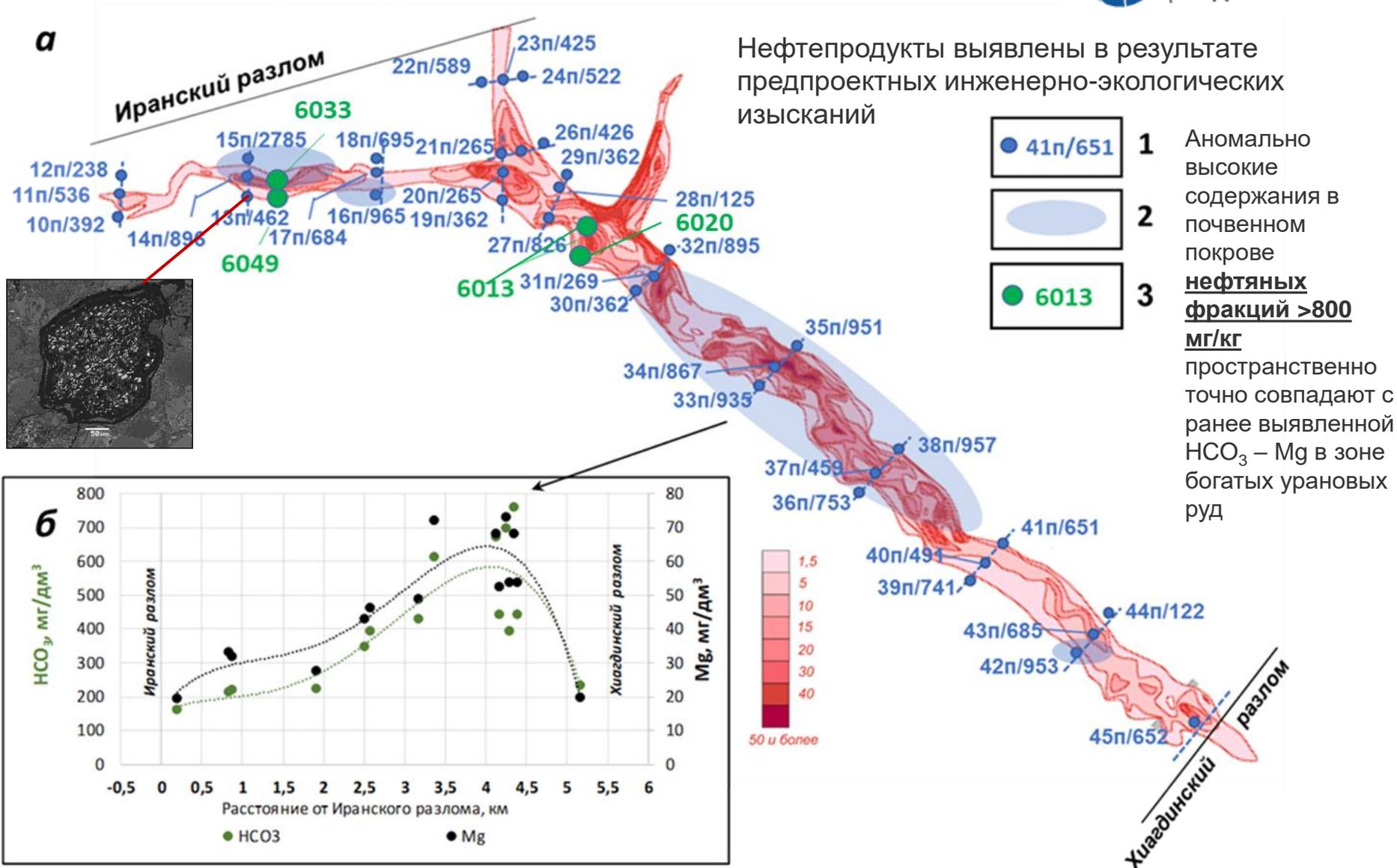


1. Механизм восхождения подземных вод из гранитного фундамента типичен для альпийских складчатых систем и схож с механизмом эксфильтрации в районе Рудных гор в Карловых Варах и Кавказских минеральных вод
2. Метеогенное происхождение и длительная миграция глубинных подземных вод доказана изотопными исследованиями урана, водорода и кислорода

Икатский хребет – региональная область питания и создания напора в подземных водах ВУРП

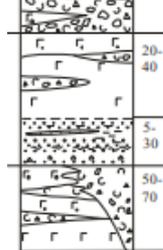
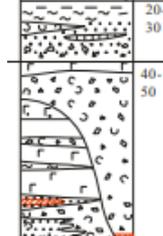
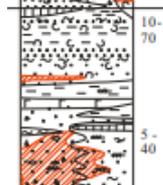


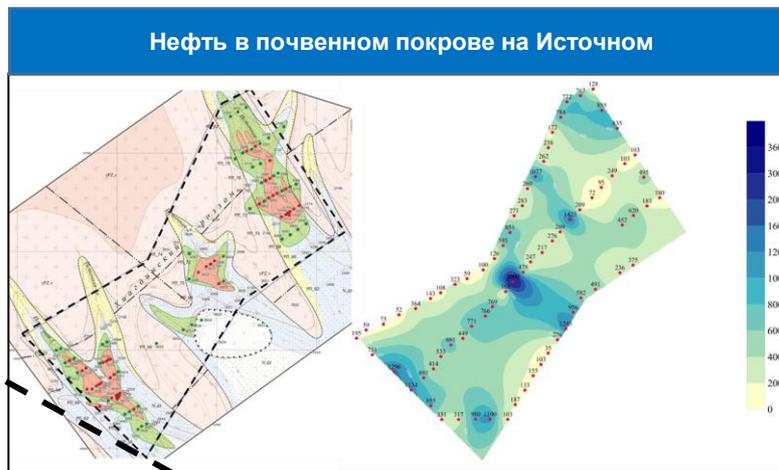
Связь богатых урановых руд с углекислыми подземными водами и аномалиями углеводородов в почвенном покрове ураноносностью



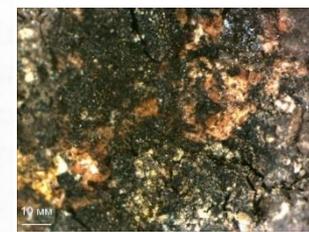
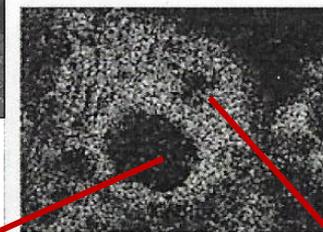
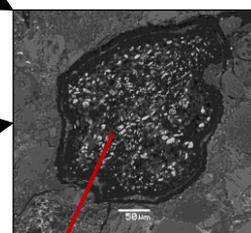
6. Углеводороды в почвенном покрове.

Сквозное проникновение углеводородов (УВ) в геологическом разрезе месторождений Хиагдинского рудного поля

Литологическая колонка	Мощность, м	Краткое описание пород
	20-30	Почвы
	20-40 5-30 50-70	Базальты
	20-30 40-50	Вулканогенно-осадочная толща
	10-70 5-40	Рудоносный осадочный горизонт
	0-40	Кора выветривания гранитов



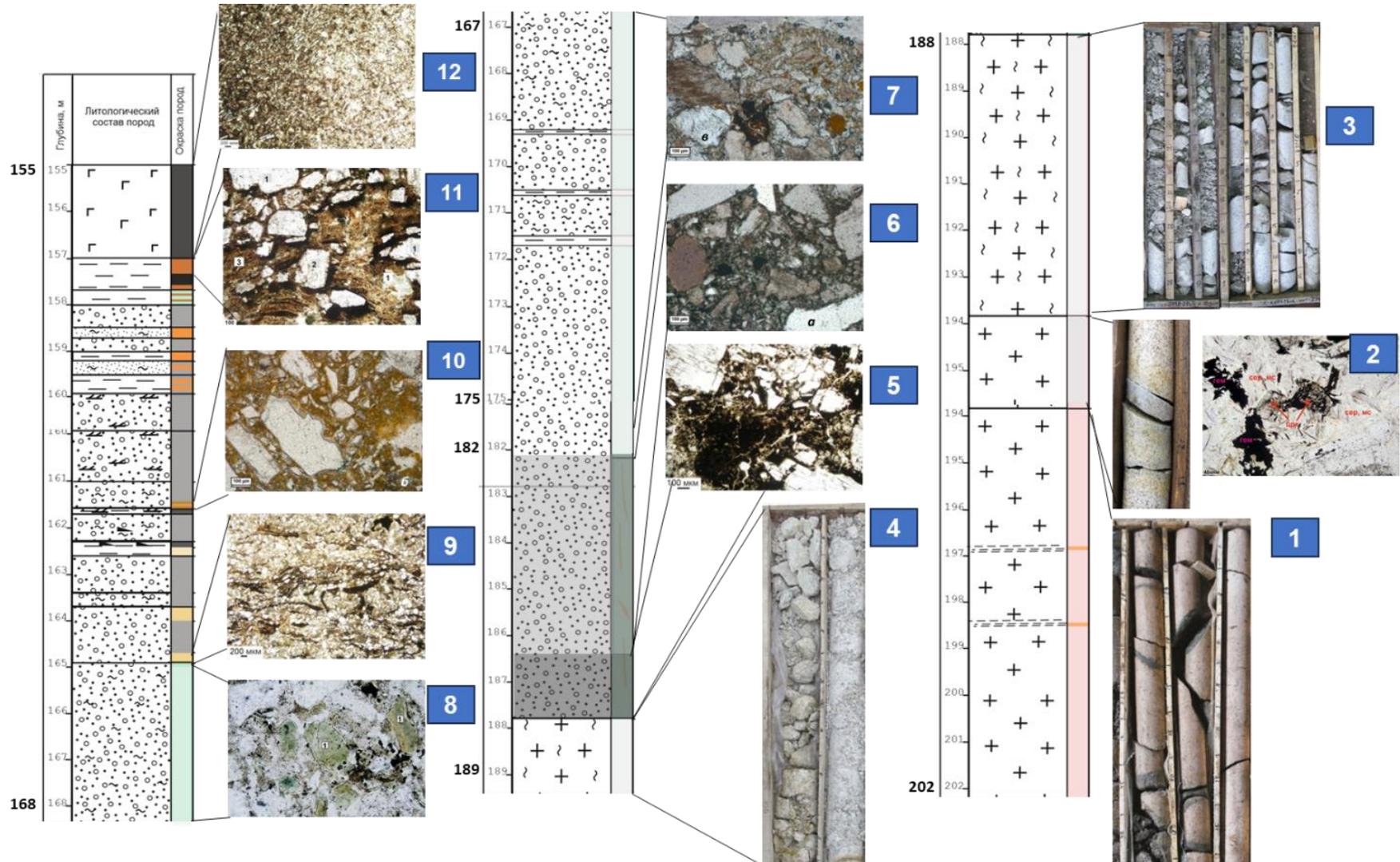
Совпадение УВ-аномалий с контурами рудных тел – новый критерий выявления месторождений витимского типа



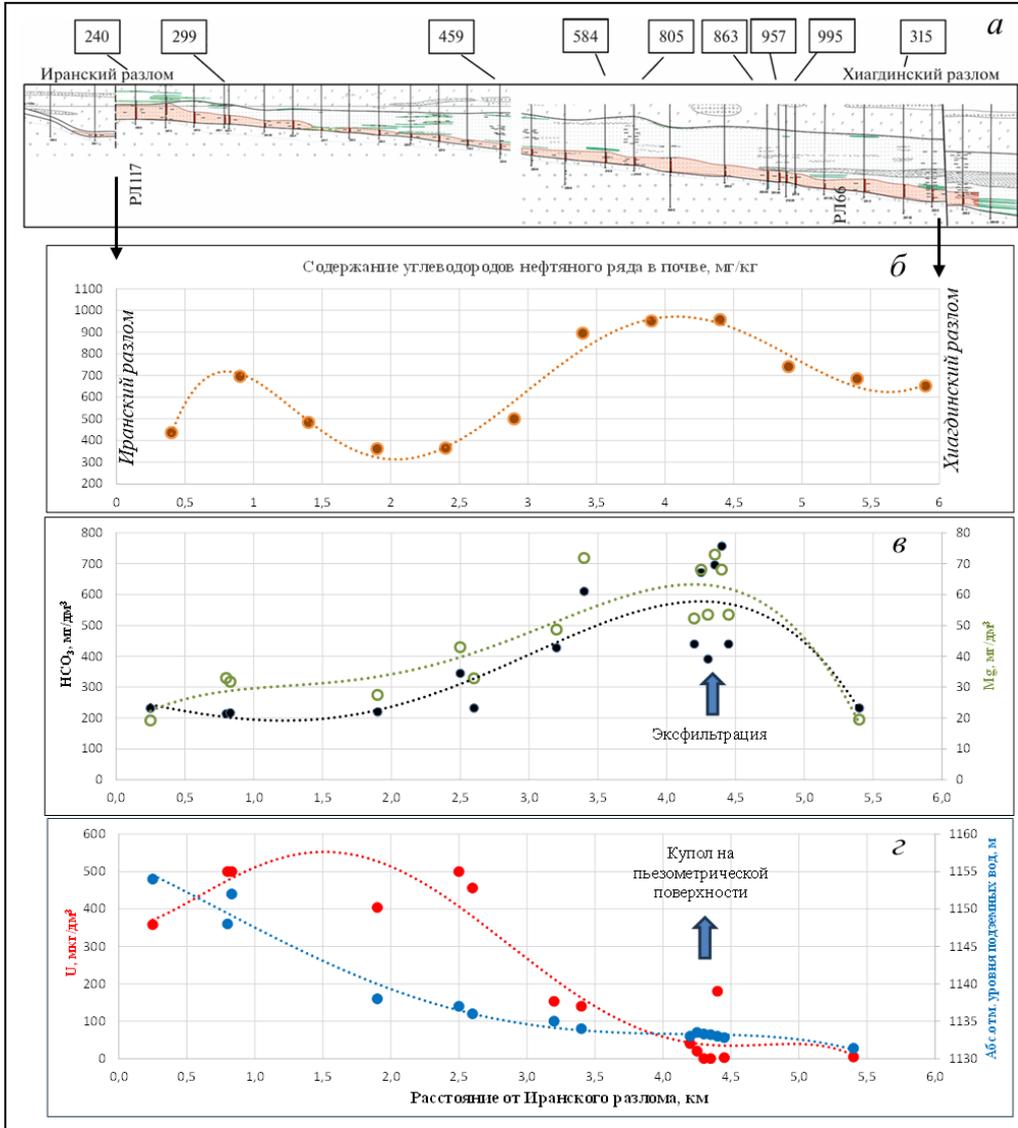
Углеродистое вещество

Фосфаты U(IV)

6. Сквозное освещение гранитов, аллювиальных отложений, вулканогенно-осадочных образований и базальтов



Гидродинамические и гидрогеохимические подтверждения существования современной эксфильтрации углекислых подземных вод



1. Гидрогеологическими методами выявлены гидродинамическая и гидрогеохимическая аномалии
2. Гидродинамика: в зоне восстановительного геохимического барьера пьезометрическая поверхность выполаживается и появляется небольшой купол
3. Гидрогеохимия: в зоне восстановительного геохимического барьера – гидрокарбонатно-магниевая аномалия
4. В обычных пластовых гидрогеологических горизонтах на коротком расстоянии 5,5 км не происходят столь контрастные изменения химического состава подземных во



РОСАТОМ
НЕДРА

2. Уточнен генезис палеодолинных инфильтрационно- эксфильтрационных урановых месторождений витимского типа

Постоянный и неподвижный восстановительный геохимический барьер

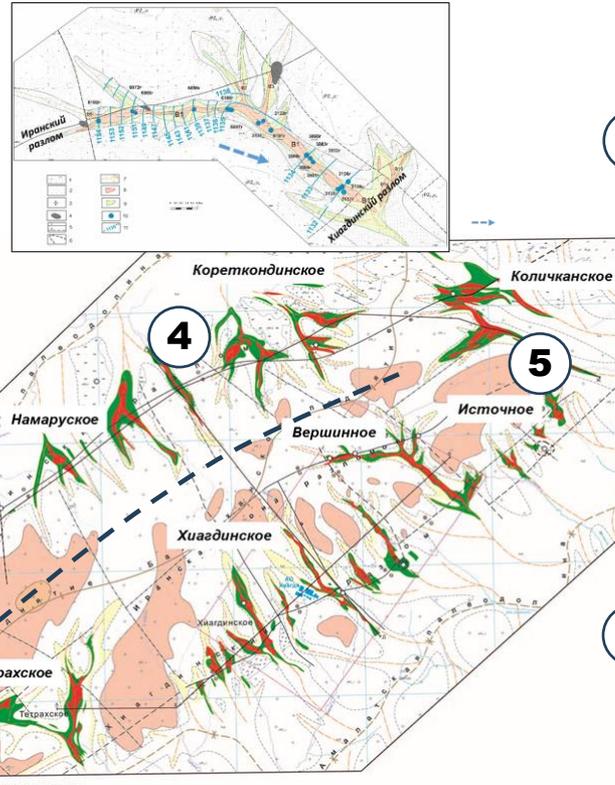


ИГЕМ
РОСАТОМ

1 Рельеф фундамента сформировался в конце олигоцена до начала формирования аллювиальных отложений

2 В рудоносные аллювиальные отложения всегда поступали инфильтрационные кислородсодержащие метеорные воды

3 Всегда существовала область питания подземных вод в рудоносных горизонтах в центральной части Байсыханского поднятия

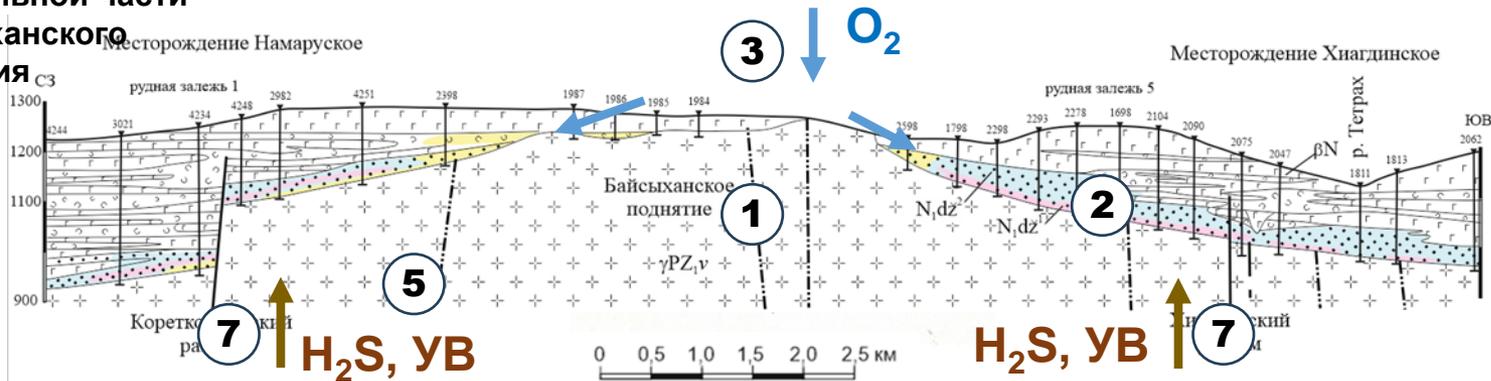


4 Рудные залежи расположены вблизи осевой линии (3) поднятия и сближены с областью питания

5 Рудные залежи пространственно совмещены с источником урана в рудах – в витимканских лейкократовых гранитах

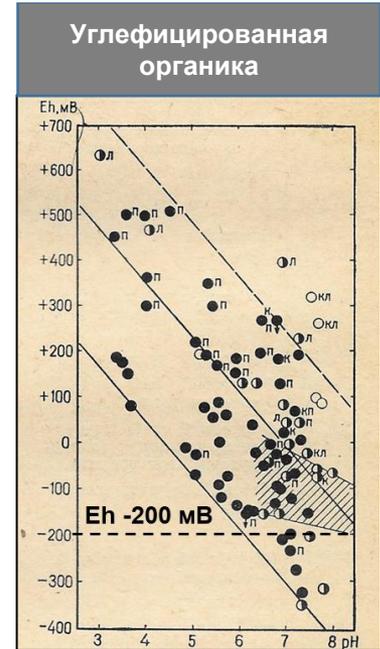
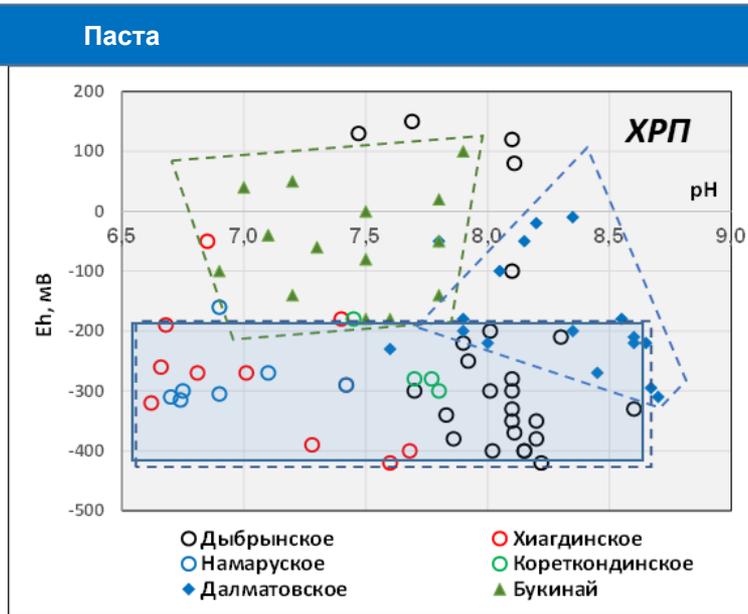
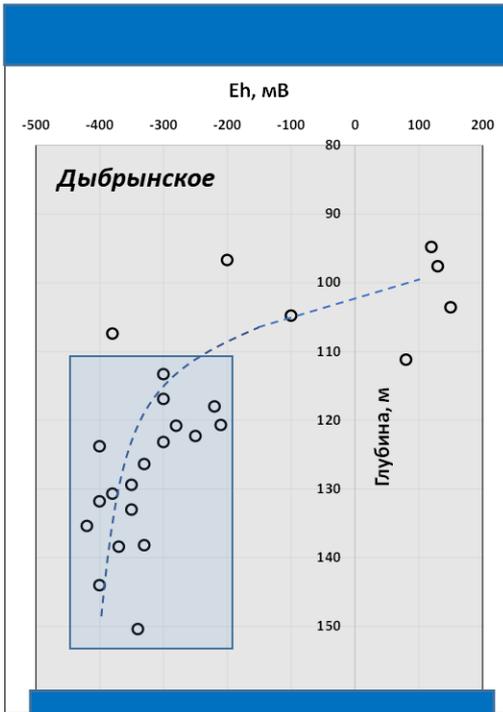
7 Постоянно восходящие из фундамента глубинные углекислые подземные воды с эпигенетическими восстановителями препятствовали окислительному разрушению урановых руд

Месторождение Намаруское

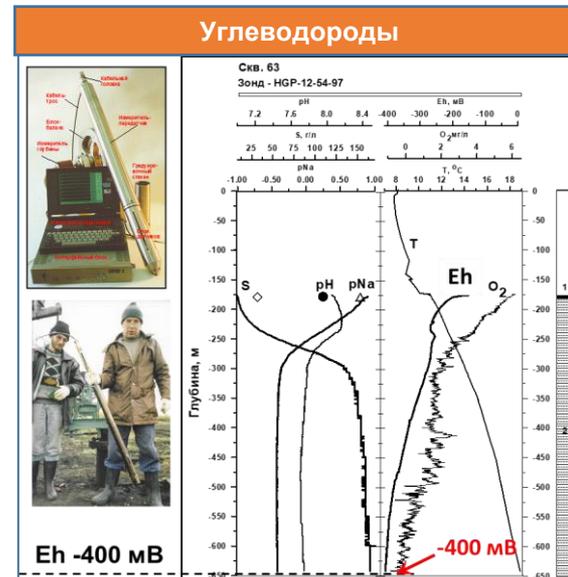
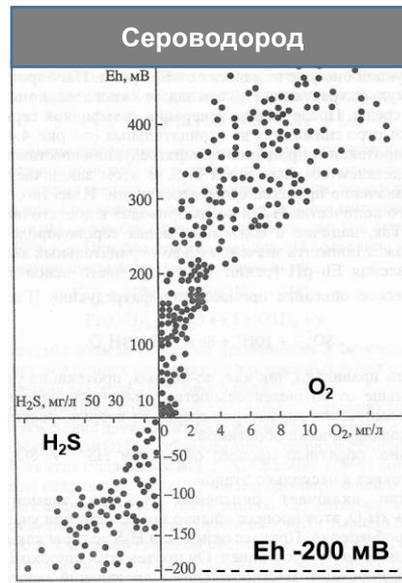
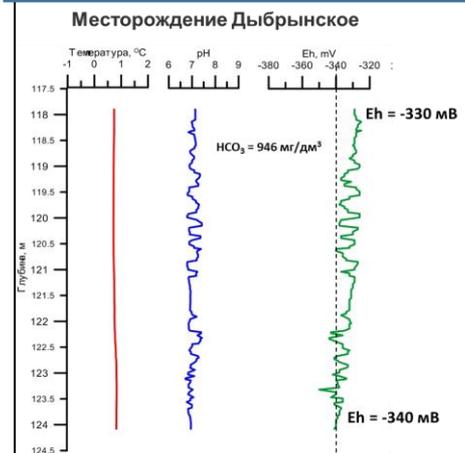


6

Высокая восстановленность литологической среды - Eh -420...-200 мВ



Гидрогеохимический каротаж



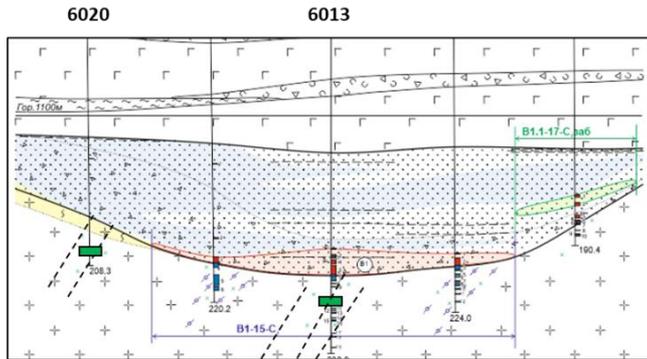
Только растворенные углеводороды способны понизить Eh до -400 мВ

Наиболее вероятно – низкое значение Eh до -420 мВ –
создает пара – углеводороды + водородные бактерии

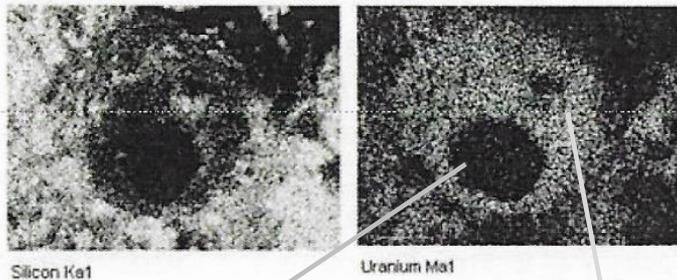
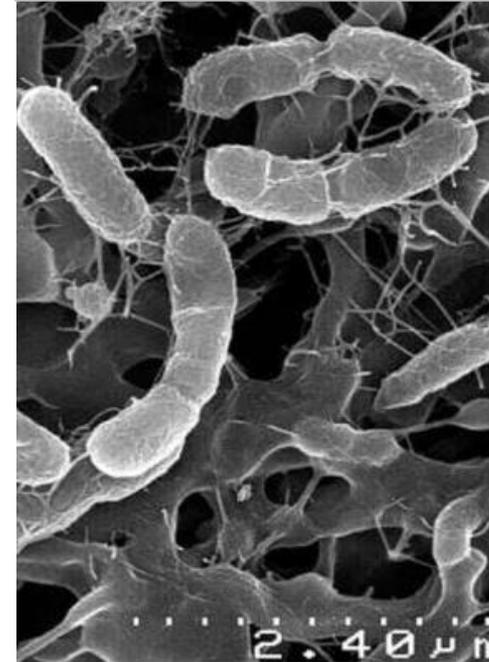


АPM3
РОСАТОМ

Углеводороды



Водородные бактерии



Углеродистое
вещество

Фосфаты урана
(нингиоит)

Углеводороды поступают в рудоносный
горизонт в составе восходящих из
фундамента углекислых подземных вод

По данным Г.А.Тархановой



РОСАТОМ
НЕДРА

3. АО «Хиагда» – единственное в мире предприятие СПВ урана в криолитозоне

Скважинное подземное выщелачивание (СПВ) урана – малозатратный способ добычи урана

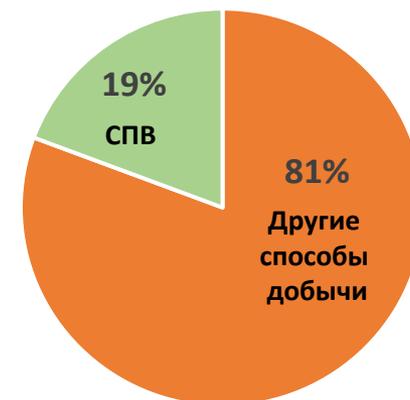


АРМЗ
РОСАТОМ

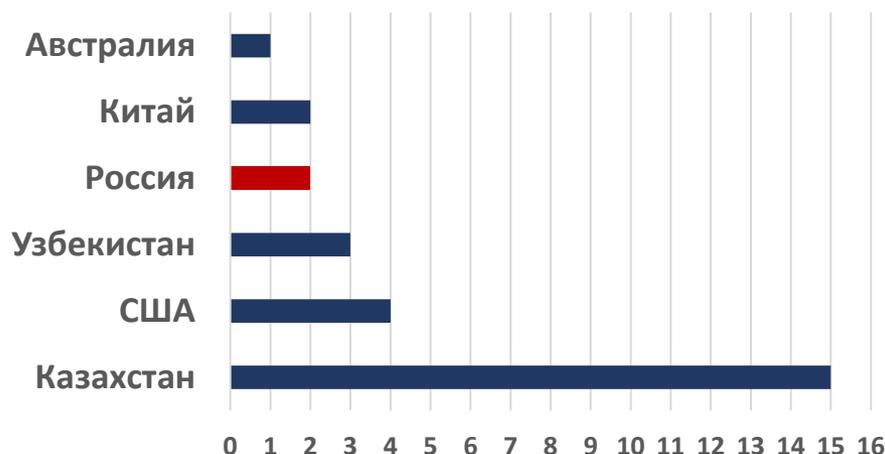
- Доля СПВ урана в мире за 15 лет увеличилась с 19 до 57%
- Также и в России с 7 до 61%
- Парадокс: добыча урана СПВ из бедных руд выгоднее добычи урана из богатых руд подземным горным способом
- Их 27 действующих рудников СПВ в мире АО «Хиагда» единственное предприятие, ведущее добычу урана в зоне распространения многолетней мерзлоты

Соотношение способов добычи урана в мире

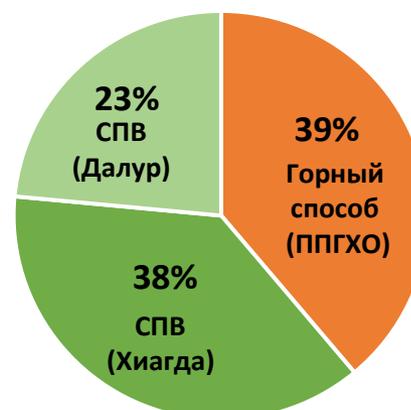
2005 г



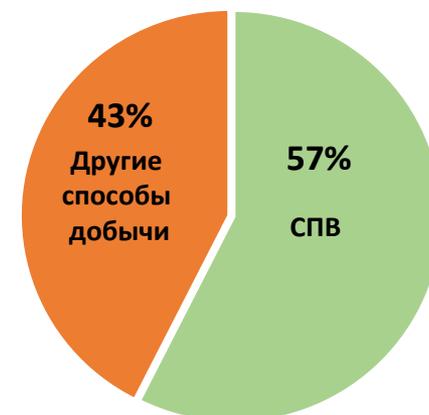
Рудники СПВ (количество)



Доля добычи урана в 2022 г (Россия)



2020 г

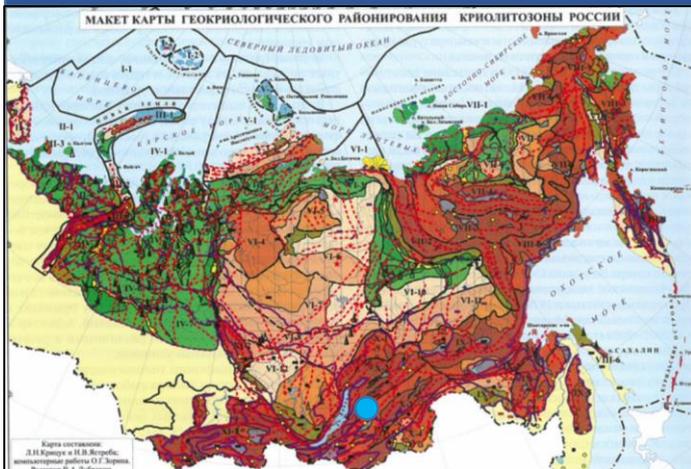


Многолетняя мерзлота и климатические условия района



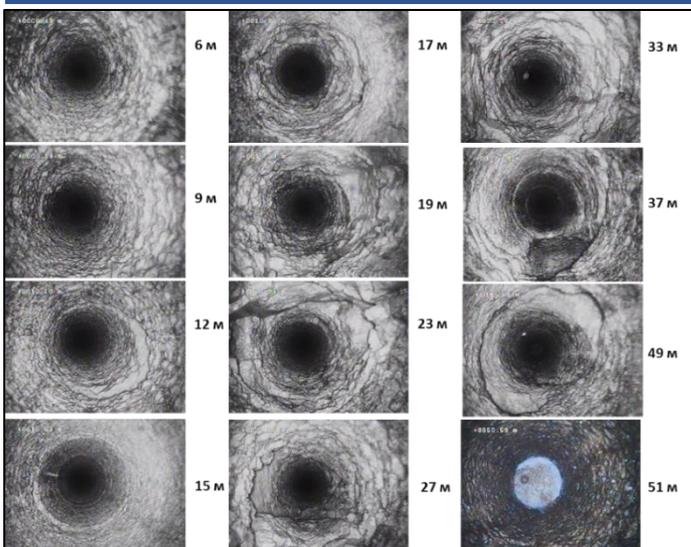
АРМЗ
РОСАТОМ

Карта геокриологического районирования криолитозоны России

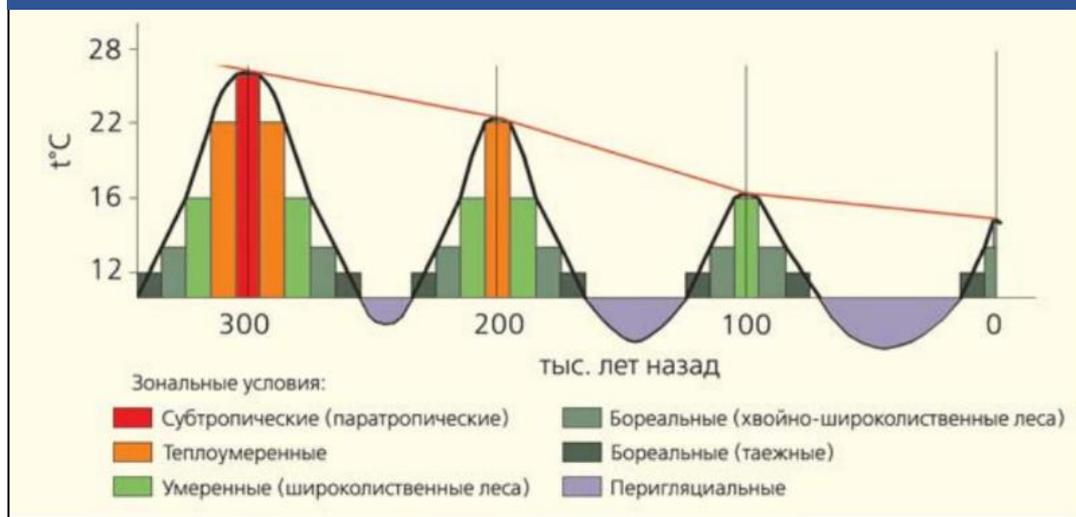


- Мерзлота образовалась в плейстоцен-голоценовый период – 2,5 – 0,6 млн.лет назад
- Согласно геокриологическому районированию промышленная территория АО «Хиагда» расположена в зоне сплошного распространения многолетнемёрзлых пород
- Тип мерзлоты – мерзлый
- Мощность мерзлоты на территории Хиагдинского рудного поля – 40-90 м
- Температура подземных вод в рудоносном водоносном горизонте – 2-4 С°
- Температура воздуха в течение года изменяется от 35С° летом и до -45С° зимой
- Среднегодовая температура отрицательная -1,6С° , что способствует сохранению мерзлоты

Вид мерзлоты в скважине (фронтальный видеокаротаж)



Циклы оледенения-оттаивания за последние 400 лет



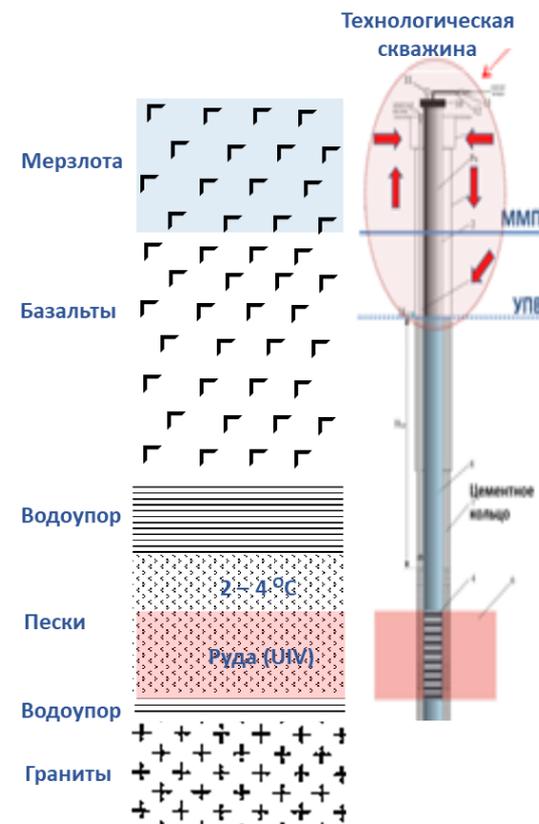
4. Задачи развития технологий СПВ урана из руд Витимского рудного района

Проблемы освоения Витимского ураново-рудного района и задачи, требовавшие решения



АРМЗ
РОСАТОМ

1. Суровые природно-климатические условия и многолетняя мерзлота
2. Неоптимальные сети вскрытия рудных залежей технологическими скважинами
3. Недостаточная надежность технологических скважин при эксплуатации в криолитозоне
4. Близость рудоносного водоносного горизонта (глубина залегания – 40-300 м) к многолетнемерзлым породам (ММП – 90 м)
5. Слабая обводненность участков урановых рудных залежей подземными водами
6. Углекислые подземные воды
7. Высокая степень восстановленности урана в рудах (U IV – 80-100%) и низкое содержание Fe в рудах
8. Отсутствие технологий снижения потерь урана в недрах и его разубоживания в продуктивных растворах
9. Сложная радиология урановых руд не позволяет получать достоверные данные об исходных и остаточных запасах урана методом ГК
10. Повышение экологической безопасности применения СПВ
11. Не оценена экономическая эффективность разрабатываемых технологий



5. Оптимизация параметров регулярных и нерегулярных сетей вскрытия рудных залежей технологическими скважинами

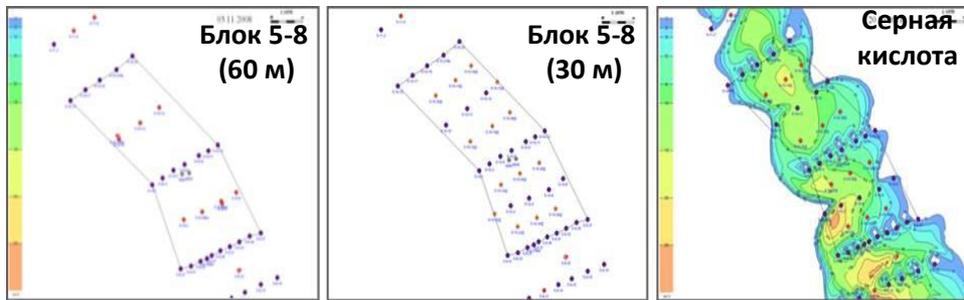
Оптимизация сети вскрытия залежи X5 Хиагдинского месторождения



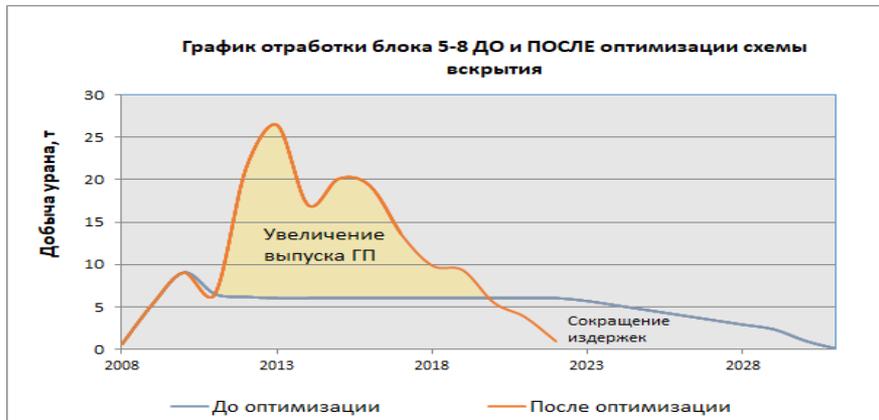
Технологический эффект:

Цель: повышение темпа отработки залежи X5

- ✓ С помощью геотехнологического математического моделирования проведены многовариантные оптимизационные расчеты отработки блоков 5-8, 5-10 залежи X5 Хиагдинского месторождения, в результате которых выбрана оптимальная сеть расположения технологических скважин



- ✓ Оптимизация сети на эксплуатационном блоке **5-8** позволила сократить срок отработки блока на 40% за счет увеличения годового выпуска урана в 3-4 раза в первые годы внедрения.



Экономический эффект:

НИОКР: 2011-2013гг

Затраты на НИОКР: 6,0 млн.руб.

Экономический эффект:

- ✓ Капитальные затраты на сооружение дополнительных технологических скважин (36,9 млн.руб) полностью окупаются в первый год внедрения технологии

Экономический эффект (2012-2022)	144,6 млн.руб.
Прирост ГП (2012-2022)	200%
Срок окупаемости (с начала инвестирования)	1,1 год

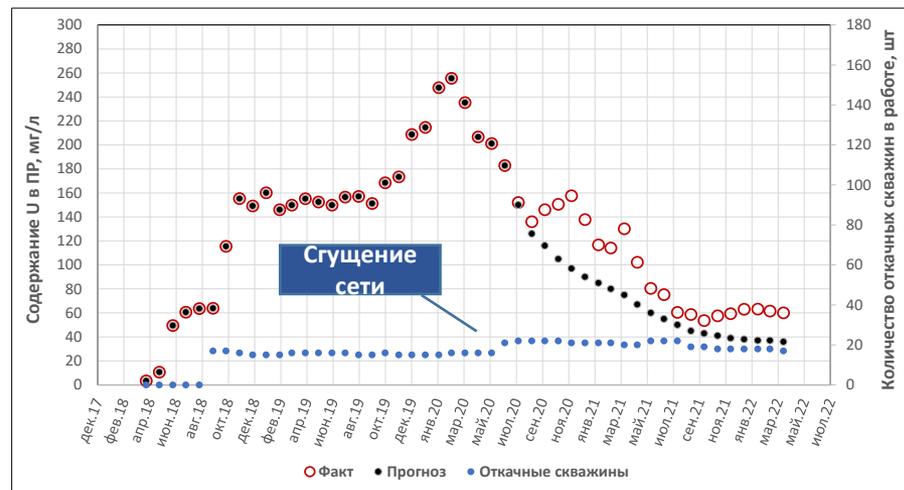
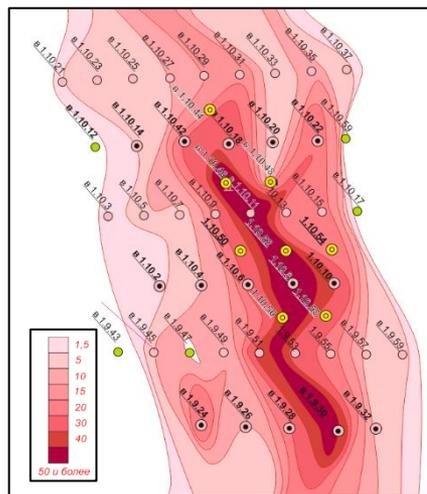
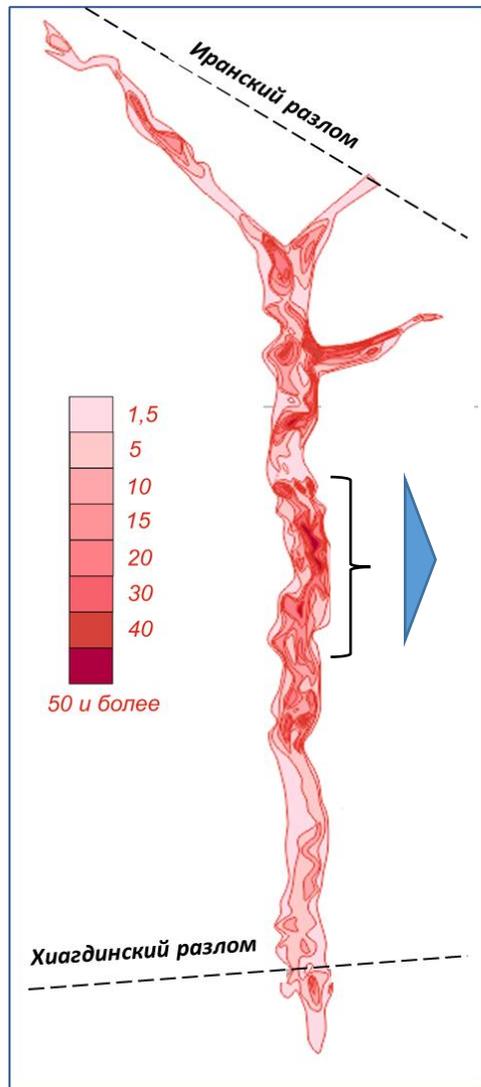


При контрастном распределении урана в рудах целесообразно использовать нерегулярные сети вскрытия залежей технологическими скважинами



AP M Z
РОСАТОМ

Нерегулярная сеть вскрытия блока В.1.10



Достигнутый экономический эффект применения нерегулярной сети на блоке В.1.10 (за расчетный период 08.2019-04.2021)

Инвестиционные затраты (бурение и насосы)	11,4 млн. руб
Прирост объема ГП	75,5 тонн (225%)
Увеличение выручки	288,8 млн. руб
Экономический эффект	68,8 млн.руб.



РОСАТОМ
НЕДРА

5. Повышение надежности эксплуатации технологических скважин в криолитозоне

Преимущества новой конструкции технологических скважин*



АРМЗ
РОСАТОМ

1. Исключение затекания талых и атмосферных вод в заколонное пространства гидроизоляцией устьев скважин вязко-упругими полимерами

2. Идеальное сцепление (адгезия) труб НПВХ с цементом и полимерами

3. Осевая устойчивость обсадных колонн из труб НПВХ исключает искривление колонны и разрыв резьбовых соединений. Наличие осевой устойчивости снимает затруднения при использовании геофизической аппаратуры и технических средств РВР

4. Поливинилхлорид тяжелее воды, поэтому при обсадке не нужно его пригружать буровым снарядом. Результат – экономия труда и времени на сооружение скважины

5. Трубы НПВХ в 2,3 раза прочнее труб ПНД. Они также как и полиэтилен стареют и теряют прочность, но их прочность на 5-й год эксплуатации в 2 раза прочнее полиэтилена.

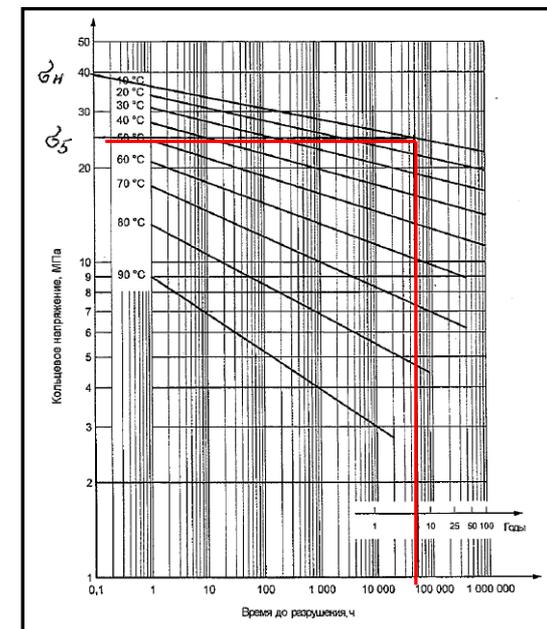
6. Низкий коэффициент линейного расширения у труб НПВХ и использование клея Тангит исключает разрыв резьбовых соединений

Гидроизоляция устья скважины упруго-пластичным материалом (гипан, аквидур и т.п.)

Исключаются затекания воды и разрушение труб на устье скважин

Хорошая осевая устойчивость обсадных колонн из НПВХ

Обсадные трубы из непластифицированного поливинилхлорида - НПВХ



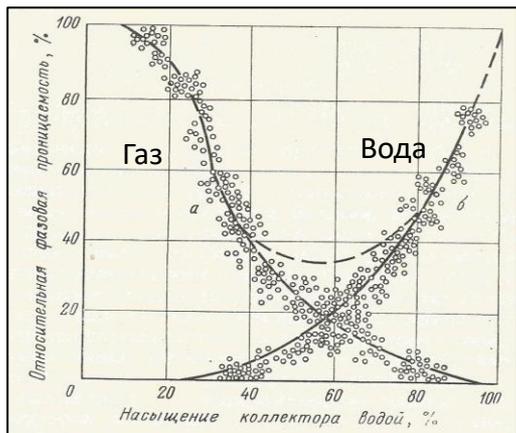
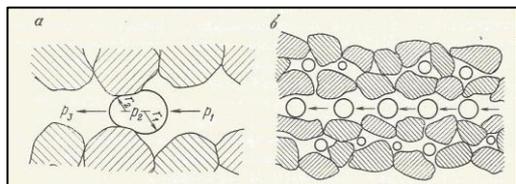
* - технические характеристики старой конструкции технологической скважины приведены в приложении 5



РОСАТОМ
НЕДРА

6. Снижение влияния углекислых подземных вод на эффективность отработки урановых рудных залежей

Газовая и твердофазовая* кольматация

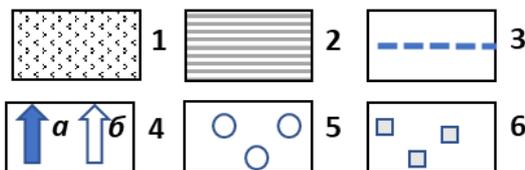
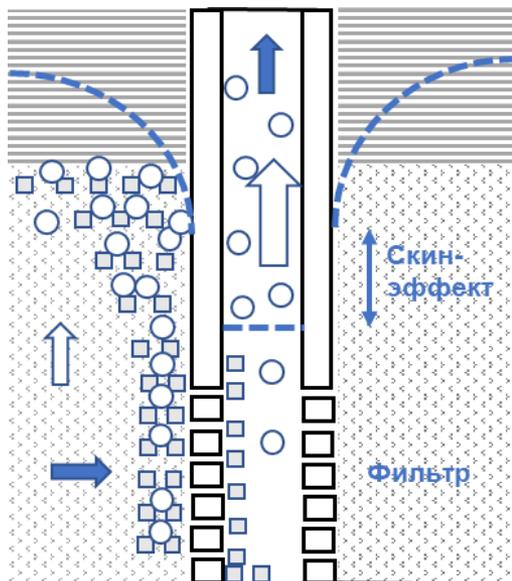


Условные обозначения:

1. Рудоносный песок
2. Водоупор
3. Уровень подземных вод
4. а) направление движения растворов; б) направление движения газовой фазы
5. Углекислый газ
6. Кальцитизация

4. При появлении в пористой среде рудоносных водоносных горизонтов свободной газовой фазы 10-20 объемн.% проницаемость жидкой фазы снижается на 48 – 70%
5. Совместное действие трех процессов в совокупности приводит к возникновению газовой кольматации:

Схема пластовой газовой и твердофазовой кольматации



- 1) растворение в серной кислоте карбонатных минералов (средняя карбонатность 0,2%)
- 2) образование CO_2 в результате разрушения гидрокарбоната природных подземных вод серной кислотой в зоне дисперсии (смешение природных и техногенных подземных вод)
- 3) высаливание природного и техногенного CO_2 при росте минерализации выщелачивающих растворов на фронте закисления пласта до 45 г/дм^3 в результате конгруэнтного и инконгруэнтного растворения минералов рудоносных отложений

* - приложение 2

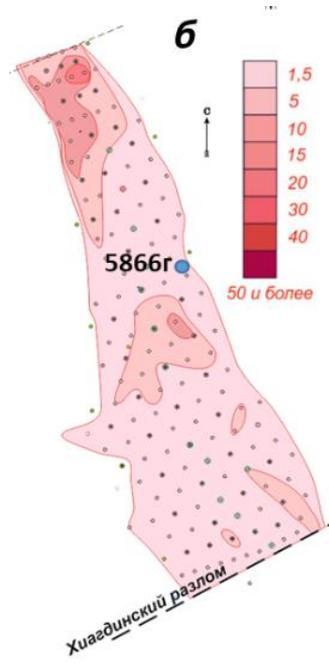
Снижение негативного влияния углекислых подземных вод на СПВ



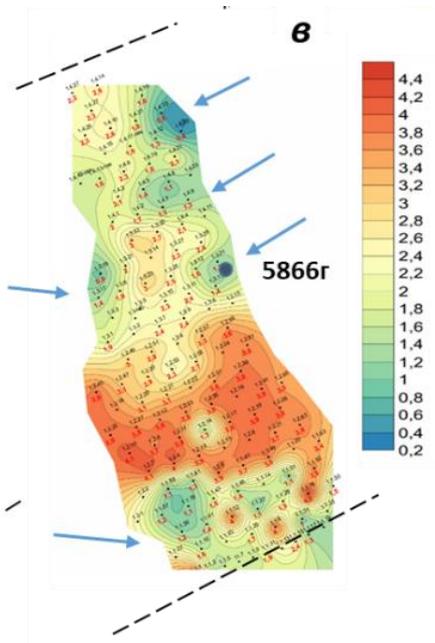
АРМЗ
РОСАТОМ

Залежь X1

Продуктивность, кг U/м²

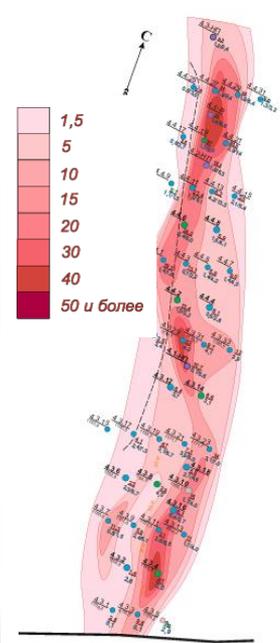


Гидрокарбонаты, г/дм³



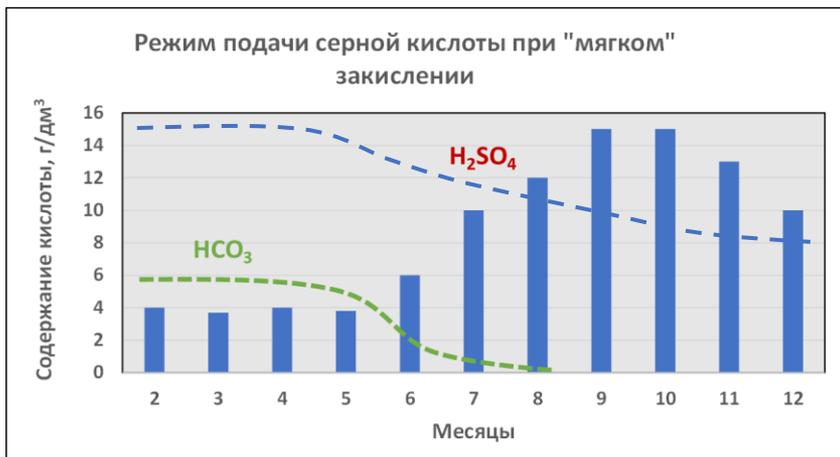
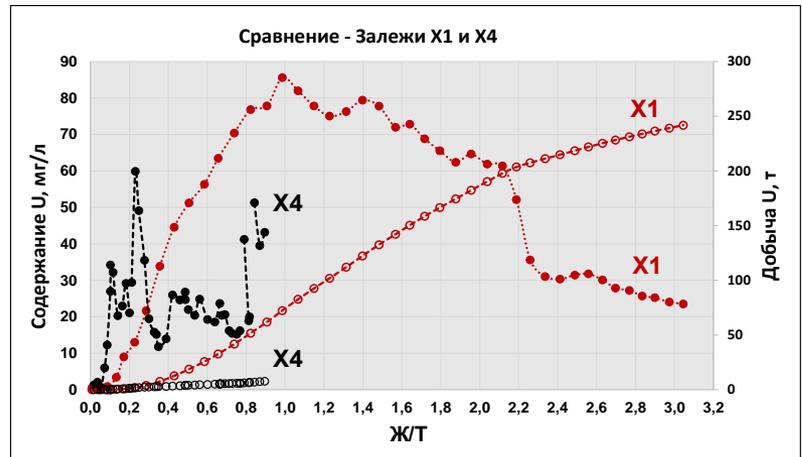
Залежь X4

Продуктивность, кг U/м²



Гидрокарбонаты, г/дм³

Глубина, м	Форма выражения анализа	Анион		
		HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
182	МГ/ДМ ³	1654	10,1	13,1
	%-ЭКВ	98	1	1
183	МГ/ДМ ³	2270	14,4	16,0
	%-ЭКВ	98	1	1
	МГ/ДМ ³	1507	0,0	11,7
191	%-ЭКВ	99	0	1
	МГ/ДМ ³	3142	13,0	26,2
	%-ЭКВ	98	1	1
224	МГ/ДМ ³	2807	0,0	23,4
	%-ЭКВ	99	0	1
	МГ/ДМ ³	1370	0,0	9,9
	%-ЭКВ	99	0	1
	МГ/ДМ ³	1397	0,0	9,2
%-ЭКВ	99	0	1	
	МГ/ДМ ³	1306	0,0	10,6
	%-ЭКВ	99	0	1





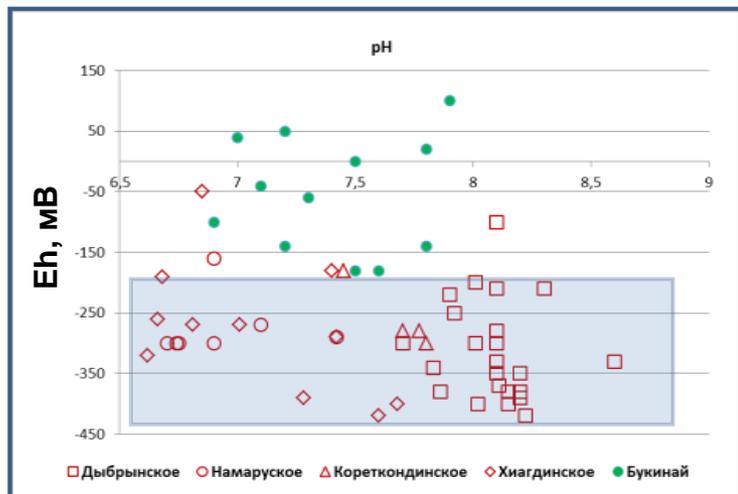
РОСАТОМ
НЕДРА

7. Обоснование выбора окислителей для интенсификации извлечения урана из руд сернокислыми растворами

Высокая восстановленность U и Fe в рудах предопределяет необходимость применения искусственных окислителей



APM3
РОСАТОМ

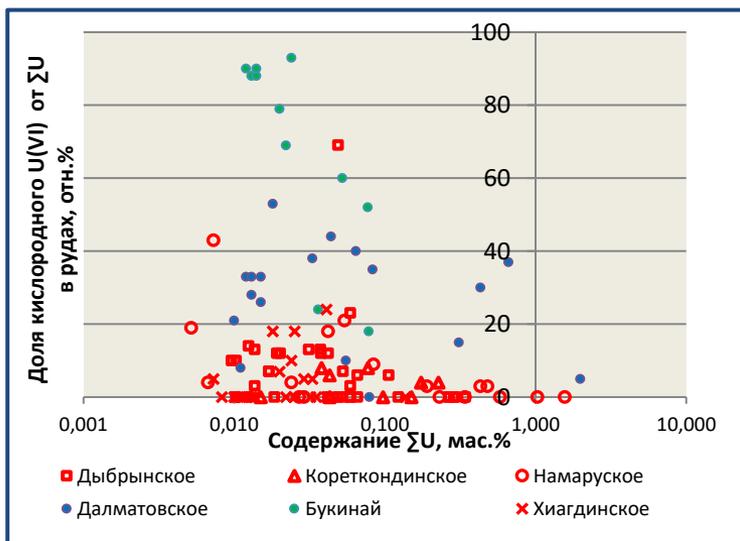


Низкий окислительный потенциал гидрогеохимической среды – $-200 \div -420$ мВ, ниже, чем на месторождениях Средней Азии и Зауральского района России

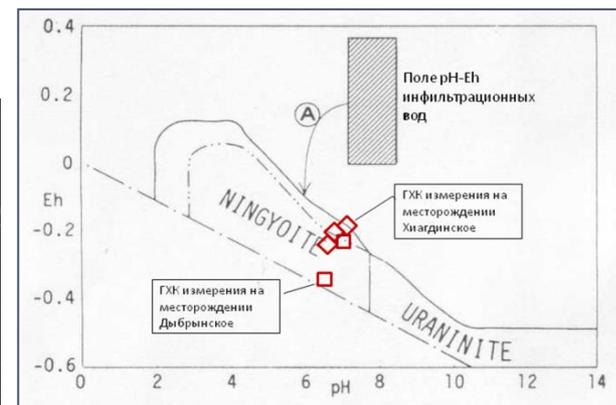
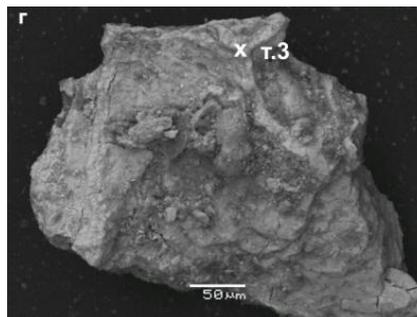
Рудные минералы в основном представлены фосфатом U(IV) - нингиоитом

Содержание U(IV) в рудах – 80-100%

Добыча урана без добавления искусственного окислителя - неэффективна



Нингиоит



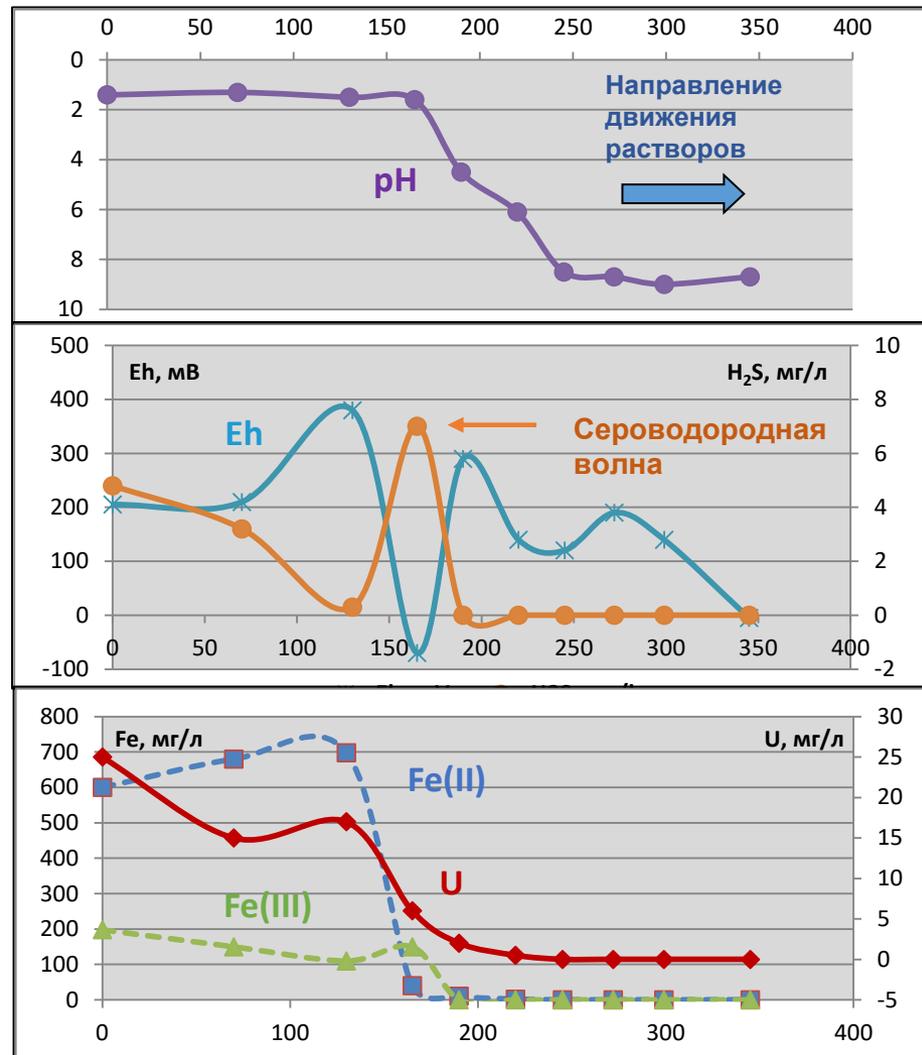
При отработке рудных залежей впереди фронта растворов серной кислоты возникает сероводородная волна



1. Образование сероводородной волны впереди фронта сернокислых растворов. На фронте закисления резко снижается окислительный потенциал.
2. Сероводород восстанавливает уран и железо в выщелачивающих растворах
3. При восстановлении Fe(III) образуется элементарная сера, экранирующая минералы урана и резко замедляющая процесс растворения

$$\text{Fe}^{3+} + \text{H}_2\text{S}_r = \text{S}_{\text{тв}} + \text{Fe}^{2+} + \text{H}_2(\text{г})$$
4. Восстановление U(VI) до U(IV) переводит уран из анионной формы $\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2^{2-}$ в катионную - USO_4^{2+} . Сорбция прекращается и резко возрастает содержание урана в хвостах

- Сероводород – продукт биогенной сульфатредукции и является «ядом» для сернокислотного СПВ урана
- Для подавления образования сероводорода также необходим окислитель

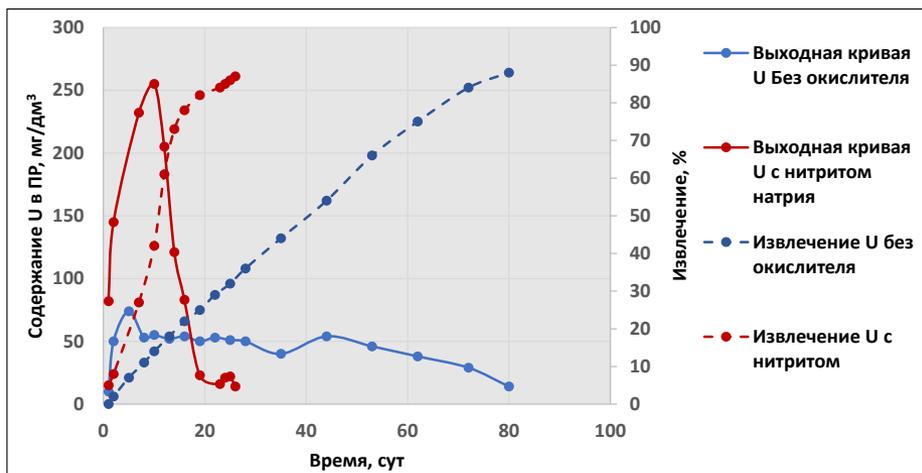


Фосфаты U(IV) без окислителя практически не растворимы в разбавленных растворах серной кислоты при pH>1,5

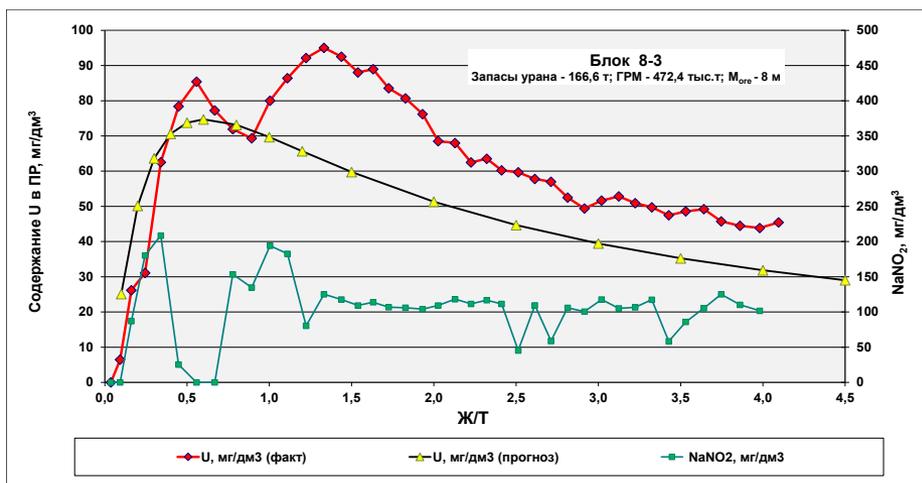


APM3
POСATOM

рН		4,1	1,8	1,3	0,7	0,45	0,3	0 (1N HCl)
Раствори- мость	моль/л	2,10E-07	2,10E-08	4,00E-06	2,60E-05	6,40E-05	1,60E-04	6,40E-04
	мг/л	0,0499	0,0499	0,95	6,19	15,23	38,1	152,3



- Выщелачивание урана из неокисленных хиагдинских руд в фильтрационных колонках (график) показало, что без окислителя процесс протекает очень медленно. Проектное извлечение 80% достигается при Ж/Т=9. Максимальная C_U не превышает 50 мг/л
- Выщелачивание с окислителем (нитрит натрия) увеличивает темп извлечения урана из руд в три раза. Проектное извлечение наступает при Ж/Т=3 и C_U достигает 255 мг/л



- Доказательство технологической эффективности применения окислителя нитрита натрия для интенсификации обработки рудных залежей
- Прекращение подачи окислителя приводит к снижению содержания урана в продуктивных растворах с 90 до 70 мг/л (на 22%)
- На основе этих данных рассчитан достигнутый экономический эффект



РОСАТОМ
НЕДРА

8. Разработка новых технологий восстановления производительности технологических скважин



Новые технологии восстановления производительности скважин

Химическая обработка скважин бифторидом аммония с пневмосвабом и эрлифтной прокачкой

Назначение:

Восстановление производительности откачных скважин методом растворения твердых новообразованных осадков внутри обсадной колонны, фильтра и в прифильтровой зоны. Применяется в комплексе с пневмосвабом и традиционной эрлифтной прокачкой

Технология:

Из всей рецептуры декольматирующих растворов наибольший эффект получен от применения бифторида аммония вместе с добавками азотной или соляной кислот. Кислоты добавляются чтобы исключить образования бифторида кальция (флюорит), который может выступать в роли вторичного кольматанта.

Внедрение:

В 2013-2015 гг выполнен НИОКР, в результате которого изучен вещественный состав кольматирующих образований и для их растворения подобрана рецептура декольматирующих растворов. С 2015 г начато внедрение данной технологии. Ежегодно обрабатывается более 100 технологических скважин.

Технологический эффект:

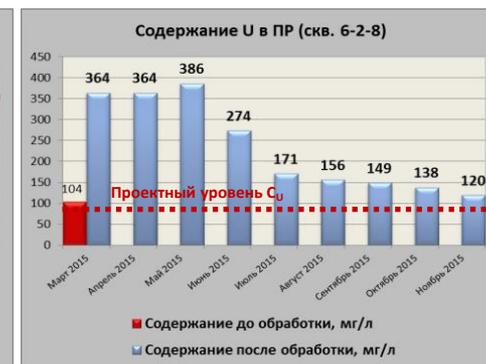
Выбранные реагенты и подобранная рецептура декольматирующих растворов эффективно удаляют техногенные осадки, сильно снижающие производительность технологических (в основном откачных) скважин – до 0,2-0,3 м³/ч.

Применение декольматирующих растворов на основе бифторида аммония увеличивает производительность откачных скважин в несколько раз по сравнению с дебитом до прокачки



Очистка внутренней поверхности обсадных труб скважины от кольматантов в результате обработки раствором бифторида аммония

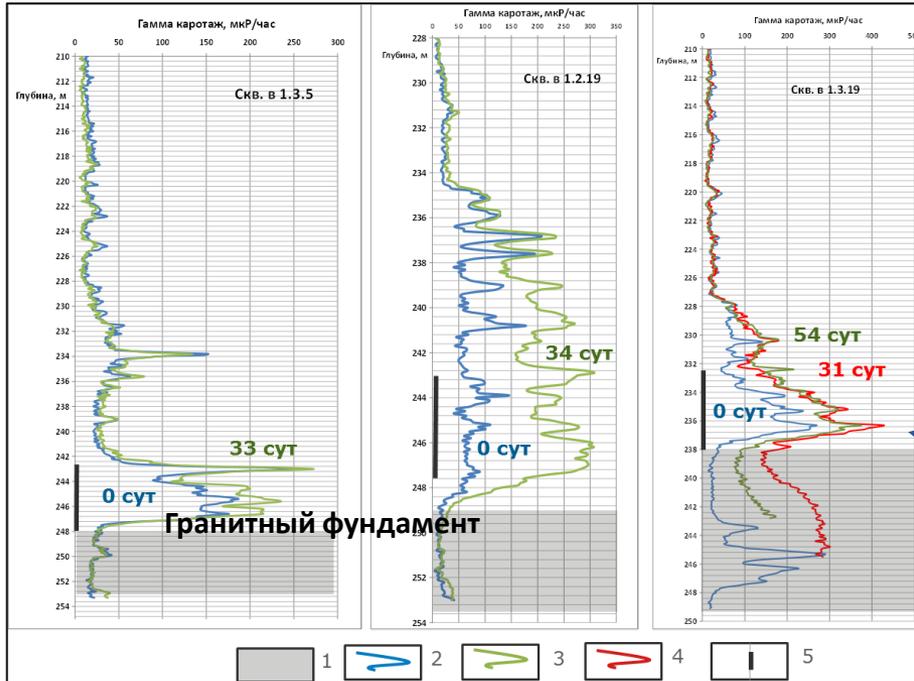
Увеличение Q и C_u по скв. 6-2-8 при обработке бифторидом аммония



9. Глубокая модификация аппаратно-методического комплекса каротажа мгновенных нейтронов и его применение на всех стадиях освоения урановых месторождений

Предпосылки создания новой модификации АМК КНД-М (АИНК-49)

Режимные гамма-каротажные наблюдения



Сложная радиология:

- Безсульфатный химический состав подземных вод способствует повышенной миграционной способности радия
- Радиоактивность природных подземных вод в рудоносных водоносных горизонтах местами достигает 60 Бк/л. Из-за этого возможно появление радиевых безурановых ореолов и урановых безрадиевых зон.
- Интенсивная тектоническая нарушенность многочисленными разломами и зонами трещиноватости скального основания на месторождениях Хиагдинского рудного поля создает благоприятные условия для проявления восходящих очаговых потоков радона из гранитов витимканского комплекса. Радон не связанный непосредственно с ураново-рудной минерализацией, значительно искажает оценку запасов урана при их определении методом гамма-каротажа (ГК)

Технические предпосылки и решение задачи:

- Недостатки предыдущей модели АИНК-60: большой внешний диаметр скважинного прибора - 60 мм; ограниченный ресурс работы генератора нейтронов - 30 час.; большие погрешности при определении содержания урана из-за отсутствия возможности учета влияния природной изменчивости влажности руд. Фактически АИНК-60 позволяет выполнять, по-существу, качественное, а не количественное определение массовой доли урана в рудах
- Для разработки аппаратно-методического комплекса АМК КНД-М (АИНК-49) были привлечены специалисты ведущих НИИ РФ: ФГУП «ВНИИА», ФГУП ГНЦ «ВНИИгеосистем», ФГУ НПП «Геологоразведка» и ООО «НПФ УГФ»

Технические характеристики АМК КНД-М (АИНК-49), метрология и аттестация



АРМЗ
РОСАТОМ

Технические характеристики

Модули и параметры	Значение
Ресурс работы нейтронного генератора, ч	200
Модуль для каротажа нейтронов мгновенного деления для определения U	есть
Модуль для гамма-каротажа	есть
Модуль определения влажности горных пород (нейтрон-нейтронный каротаж)	есть
Диаметр скважинного прибора, мм	49
Скорость каротажа, м/ч	60



Градировочный блок



Пульт управления



Генератор нейтронов

Метрология и аттестация

- Опытные образцы АМК КНД-М разработаны и изготовлены ФГУП «ВНИИА» в 2011-2012 г.г. В 2013 г. по результатам опытно-промышленных испытаний комплекс прошел метрологическую аттестацию в ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» (г. Санкт-Петербург) и утвержден в качестве типа средств измерений с внесением в Государственный Реестр РФ.
- Федеральным Агентством по техническому регулированию и метрологии выдано свидетельство об утверждении типа средства измерения - RU.C.38.001ANо 53794.
- Специалистами ФГУ НПП «Геологоразведка» разработана методика измерений (Инструкция..., 2014), аттестованная по ГОСТ Р8.563-2009 и ГОСТ 8.010-2013.
- Свидетельство об аттестации № 634/210-01.00250 выдано ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» в 2015 г.
- На узел скважинного генератора нейтронов для каротажа урановых руд 16.04.2015 получен Патент на полезную модель №152266 (патентообладатели - ФГУП «ВНИИА» и АО «Русбурмаш»).
- Поверка АИНК-49 осуществляется согласно Методике поверки ТАИНК183 МП в ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»
- Полевая калибровка скважинных приборов осуществляется на аттестованной контрольно-поверочной скважине АО СОСВУРП-КПС-1 ХИАГДА. Свидетельство на аттестованный объект АО аттестованный объект № АО 95.532-49-2021 выдано АО «ВНИИМ» 25.11.2021г.

Применение АИНК-49 на всех стадиях освоения урановых месторождений



Разведка и вскрытие залежей технологическими скважинами

1. При прямом определении урана методом КНД-М исключаются погрешности при оценке запасов урана характерные для ГК и связанные с нарушением U-Ra и Ra-Rn радиоактивного равновесия
2. При использовании КНД-М в некоторых случаях может быть сокращен объем геологического опробования керна, химико-аналитических и радиометрических определений урана, радия, калия и тория. В этом случае керновое опробование может быть использовано выборочно только для заверки результатов КНД-М

Отработка рудных залежей

1. КНД-М применяется для контроля выщелачивания урана из руд на месте их залегания с использованием мониторинга в существующих наблюдательных скважинах, а также для оценки линейных запасов урана при добурировании новых и перебурировании аварийных технологических скважин
2. На этом этапе КНД-М в контрольных скважинах позволяет выявлять остаточный уран, неотработанные целики и переотложенный уран в условиях техногенно измененной радиологической обстановки, когда метод ГК не применим

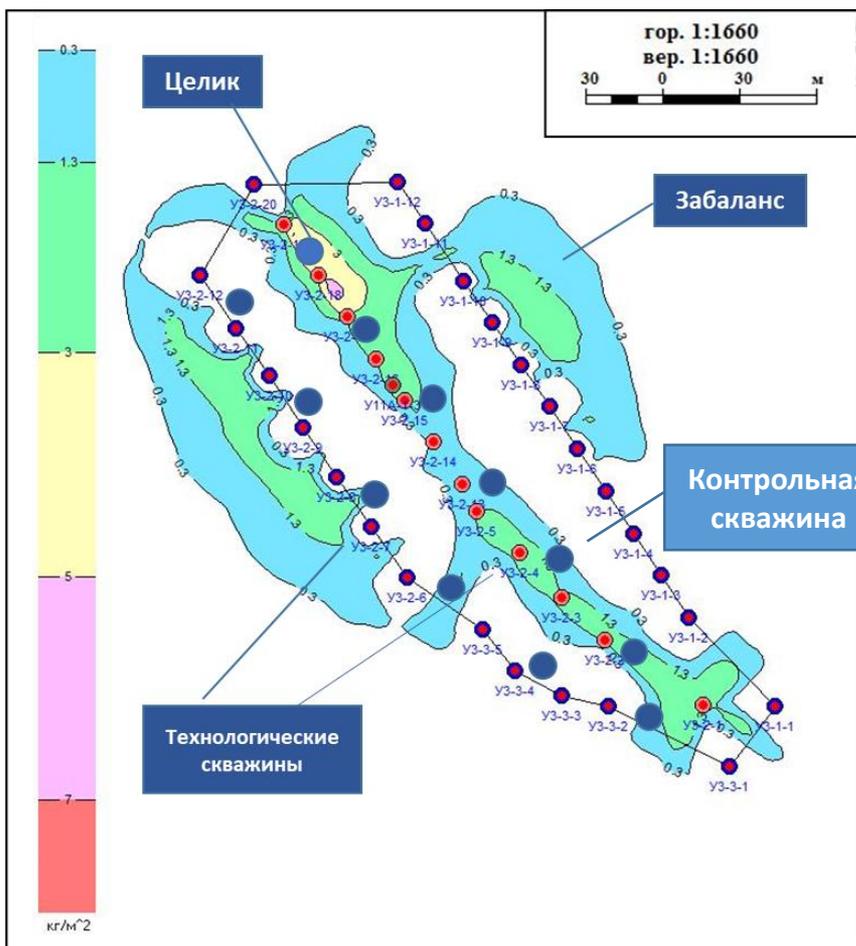


Применение КНД-М на стадии завершения отработки эксплуатационных блоков

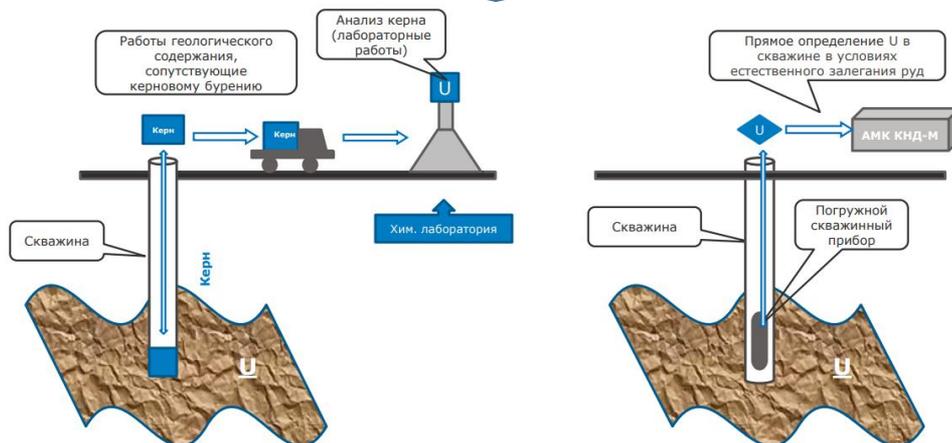


АРМЗ
РОСАТОМ

Остаточная продуктивность



- При традиционной оценке остаточных запасов в отработанном блоке в данном конкретном случае необходимо пробурить 12 контрольных скважин с опробованием керна
- Сочетание геотехнологического моделирования с каротажем нейтронов мгновенного деления позволяет значительно сократить затраты
- Геотехнологическим моделированием выявляются целики не отработанных СПВ урановых руд, что позволяет сократить объемы контрольного бурения
- Достаточно пробурить три контрольные скважины, чтобы заверить целик остаточных урановых руд
- Также будет исключено бурение с керном и лабораторные аналитические исследования





РОСАТОМ
НЕДРА

10. Разработка технологий, обеспечивающих полноту и качество освоения недр скважинным подземным выщелачиванием

Потери урана и их минимизация при неоптимальной схеме вскрытия залежей технологическими скважинами



АРМЗ
РОСАТОМ

Продуктивность участка рудной залежи кг U/м²

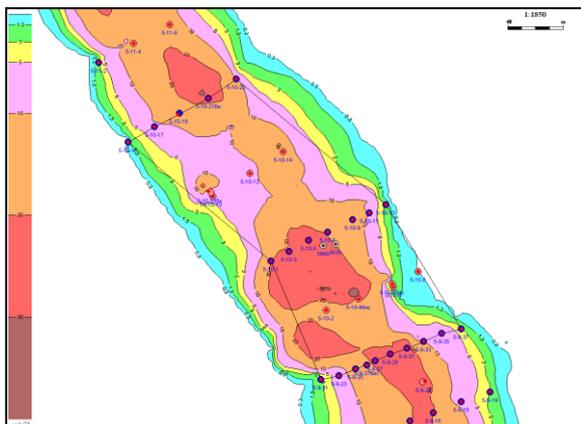
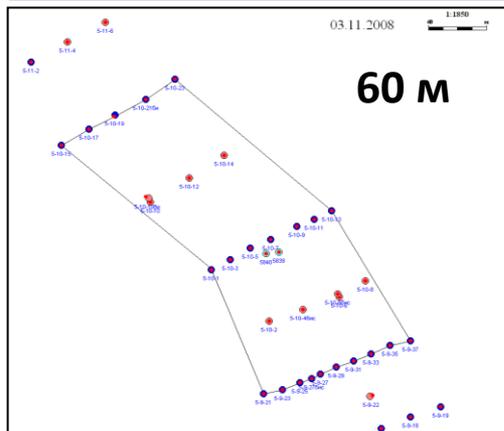
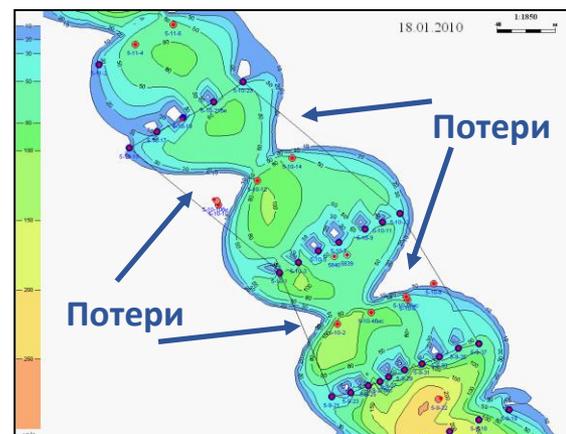


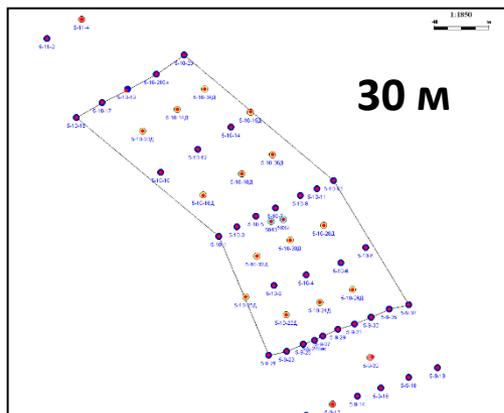
Схема расположения технологических скважин



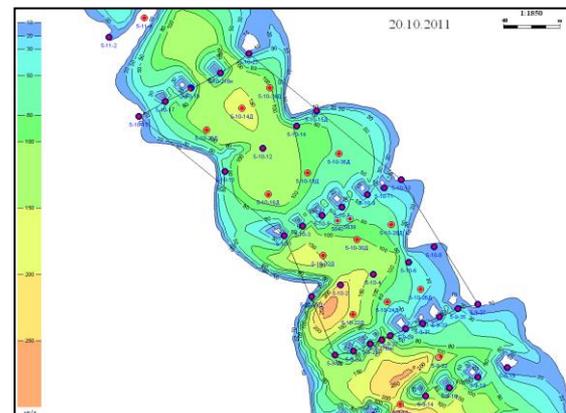
Распространение серной кислоты по площади блока



Оптимизация схемы вскрытия



Исключение потерь

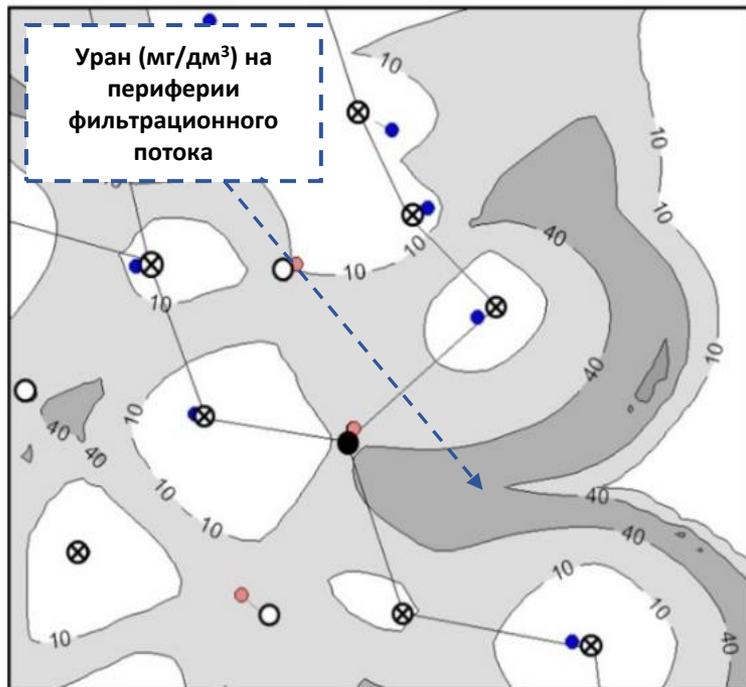


Оптимальная схема вскрытия рудной залежи – это не только низкая себестоимость, но и исключение сверхнормативных потерь урана в недрах

Неизбежные нормативные потери в результате выноса урана на периферию фильтрационного потока



План

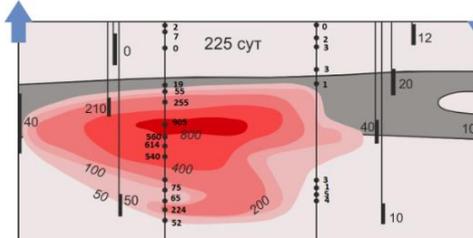


Уран на периферии фильтрационного потока выщелачивающих растворов в разрезе (мг/л). Данные контрольного бурения

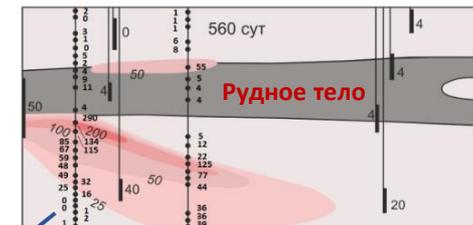
Разрез

Сутки от начала отработки блока

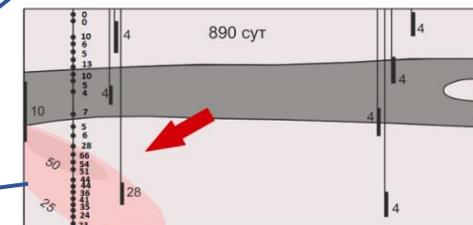
225



560



860



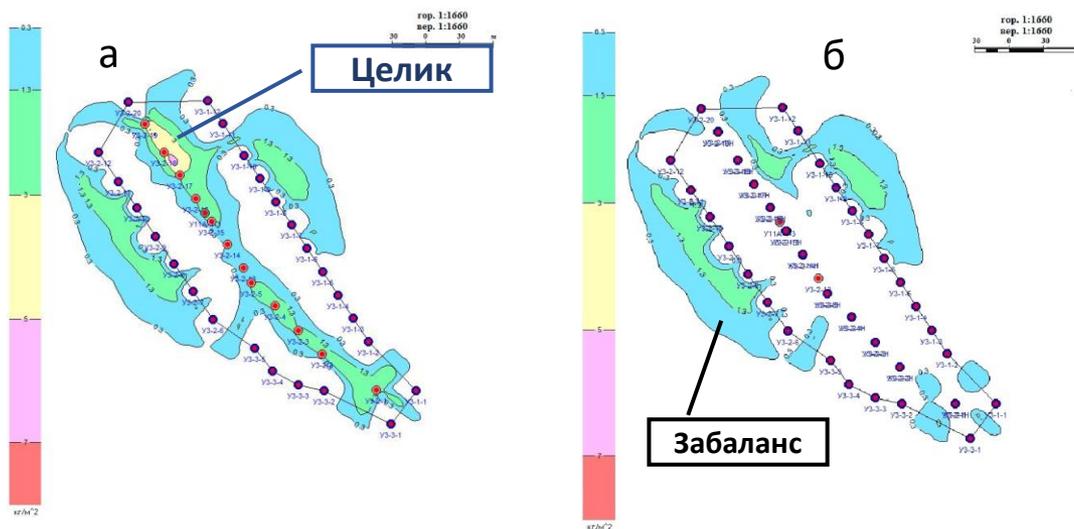
км 2 0 2 4 6 8 10 км



Потери урана и их устранение в целиках и застойных гидродинамических зонах



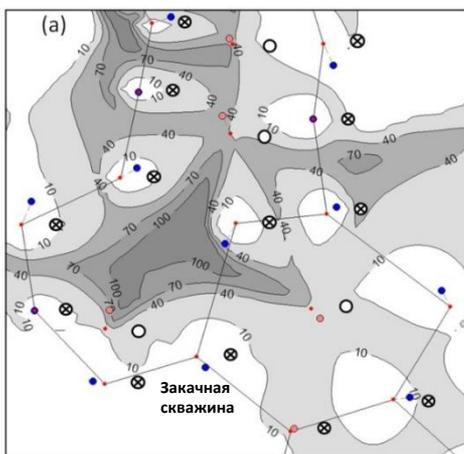
Ликвидация целика в результате интенсификации работы скважин центрального ряда



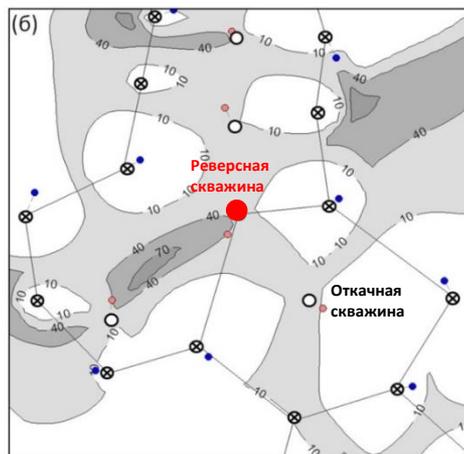
- Целики выявляются геотехнологическим моделированием
- Результаты моделирования заверяются бурением единичных контрольных скважин
- Контроль ликвидации целика ведется по балансу урана

Ликвидация потерь урана (мг/л) в застойной гидродинамической зоне реверсированием потока

До реверсирования потока



После реверсирования потока



- Целики выявляются геотехнологическим моделированием
- Результаты моделирования заверяются бурением единичных контрольных скважин
- Контроль ликвидации целика ведется по балансу урана

Оценка неизбежных потерь урана на стадии завершения отработки рудных залежей



- Залежь выводится из эксплуатации при достижении концентрации урана в продуктивных растворах (ПР) его минимального промышленного содержания
- Минимальное промышленное содержание урана в ПР – экономический параметр. Рассчитывается с использованием матрицы, в которой переменными величинами являются – добавляемая серная кислота и содержание урана в ПР (кг/м³)
- Минимальное промышленное содержание урана в остаточных растворах после завершения отработки залежей – это неизбежные потери урана в недрах при СПВ

Содержание урана в ПР, мг/л	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
Расход кислоты на доукрепление 1 м ³ ВР в кг														
2,0	- 20	- 4	12	28	45	61	77	94	110	126	142	159	175	191
2,5	- 24	- 8	8	24	41	57	73	89	106	122	138	155	171	187
3,0	- 28	- 12	4	20	37	53	69	85	102	118	134	151	167	183
3,5	- 33	- 16	0	16	33	49	65	81	98	114	130	146	163	179
4,0	- 37	- 20	- 4	12	29	45	61	77	94	110	126	142	159	175
4,5	- 41	- 24	- 8	8	24	41	57	73	90	106	122	138	155	171
5,0	- 45	- 28	- 12	4	20	37	53	69	86	102	118	134	151	167
5,5	- 49	- 32	- 16	0	16	33	49	65	81	98	114	130	147	163
6,0	- 53	- 36	- 20	- 4	12	29	45	61	77	94	110	126	142	159
6,5	- 57	- 41	- 24	- 8	8	25	41	57	73	90	106	122	138	155
7,0	- 61	- 45	- 28	- 12	4	21	37	53	69	86	102	118	134	151
7,5	- 65	- 49	- 32	- 16	0	16	33	49	65	82	98	114	130	147
8,0	- 69	- 53	- 36	- 20	- 4	12	29	45	61	77	94	110	126	143
8,5	- 73	- 57	- 40	- 24	- 8	8	25	41	57	73	90	106	122	139
9,0	- 77	- 61	- 44	- 28	- 12	4	21	37	53	69	86	102	118	134
9,5	- 81	- 65	- 49	- 32	- 16	0	17	33	49	65	82	98	114	130
10,0	- 85	- 69	- 53	- 36	- 20	- 4	12	29	45	61	78	94	110	126
10,5	- 89	- 73	- 57	- 40	- 24	- 8	8	25	41	57	74	90	106	122
11,0	- 93	- 77	- 61	- 44	- 28	- 12	4	21	37	53	69	86	102	118
11,5	- 97	- 81	- 65	- 48	- 32	- 16	0	17	33	49	65	82	98	114
12,0	- 101	- 85	- 69	- 52	- 36	- 20	- 4	13	29	45	61	78	94	110
12,5	- 105	- 89	- 73	- 57	- 40	- 24	- 8	9	25	41	57	74	90	106
13,0	- 109	- 93	- 77	- 61	- 44	- 28	- 12	4	21	37	53	70	86	102
13,5	- 113	- 97	- 81	- 65	- 48	- 32	- 16	0	17	33	49	66	82	98
14,0	- 117	- 101	- 85	- 69	- 52	- 36	- 20	- 4	13	29	45	61	78	94
14,5	- 122	- 105	- 89	- 73	- 56	- 40	- 24	- 8	9	25	41	57	74	90



РОСАТОМ
НЕДРА

11. Создание ресурсосберегающей и экологически сбалансированной технологии управления ресурсами подземных вод для отработки СПВ слабообводненных рудных залежей

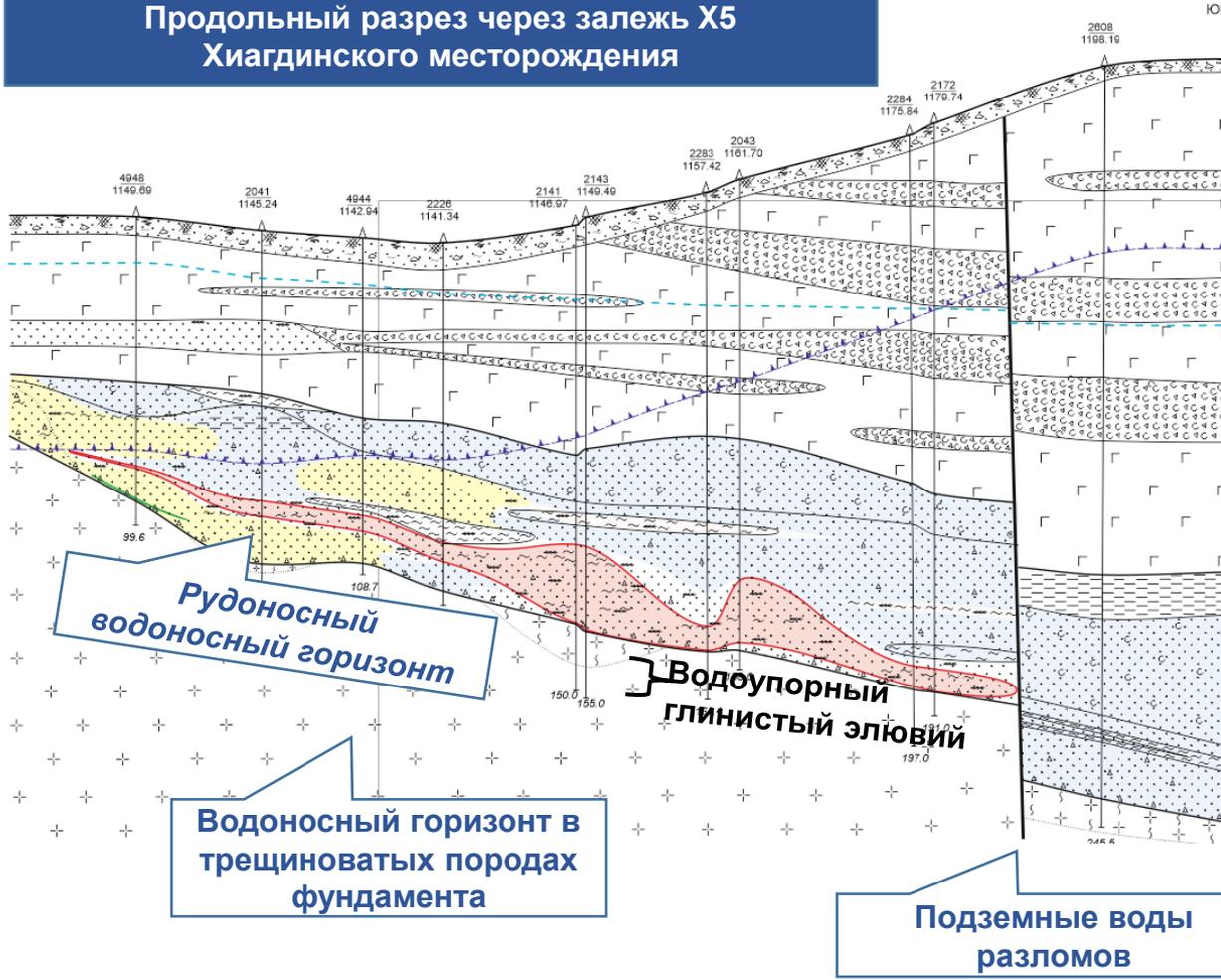
Гидрогеологическая структура

Байсыханское поднятие – гидрогеологический массив



АРМЗ
РОСАТОМ

Продольный разрез через залежь Х5
Хиагдинского месторождения



Сезонный водоносный горизонт
грунтовых вод

Мерзлота (40 – 90 м)

Базальтовый водоносный
горизонт

Вулканогенно-осадочная
водоупорная толща (болотно-
озерные отложения с
вулканитами)

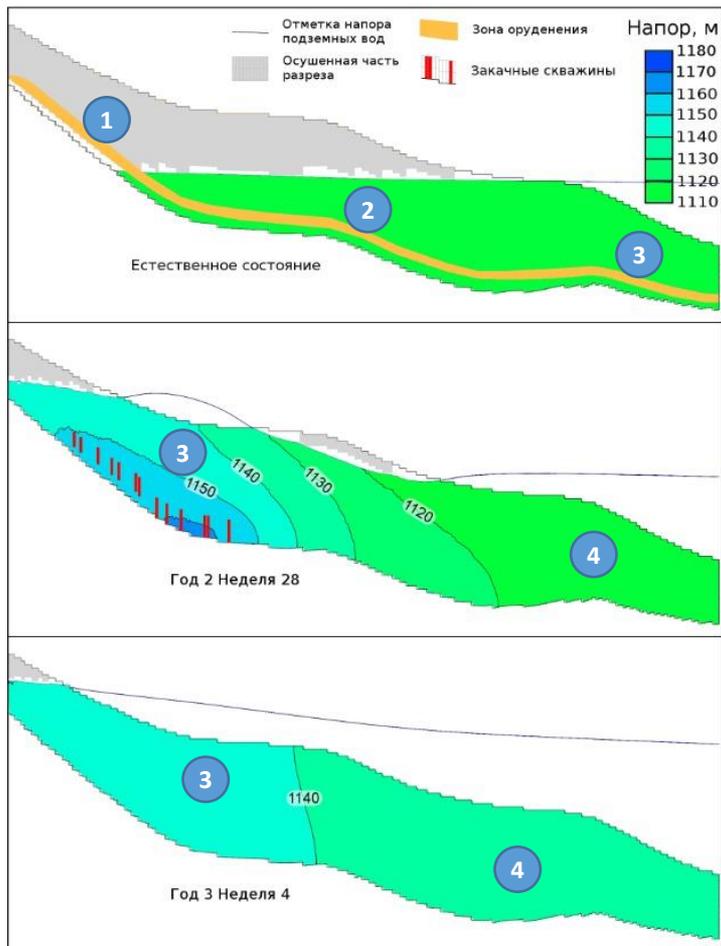
Рудоносный
водоносный горизонт

Водоупорный
глинистый элювий

Водоносный горизонт в
трещиноватых породах
фундамента

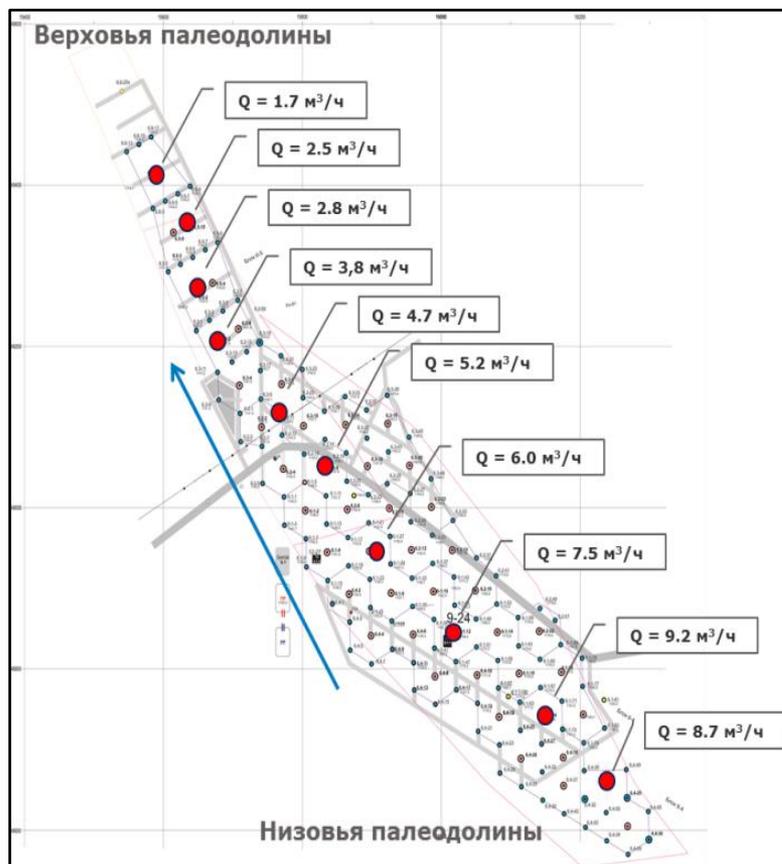
Подземные воды
разломов

Градации обводненности водоносных рудоносных горизонтов



1. Безводные – сухие участки рудных залежей
2. Слабообводненные – безнапорный режим фильтрации, при котором производительность эксплуатационных ячеек (откачная скважина и закачные скважины, обеспечивающие баланс закачиваемых-откачиваемых растворов) составляет не менее $2 \text{ м}^3/\text{ч}$
3. Достаточно обводненные – напорный режим фильтрации и производительность ячеек соответствует проектному уровню – $4 \text{ м}^3/\text{ч}$
4. Высокообводненные – напорный режим фильтрации и производительность эксплуатационных ячеек $6 \text{ м}^3/\text{ч}$ и более

Проблема: низкая производительность эксплуатационных скважин из-за слабой обводненности рудоносного горизонта



По оценке гидрогеологических условий месторождений примерно 20% запасов урана в Хиагдинском рудном поле (9,6 тыс.т) и в Витимском УРР (34 тыс.т) находятся в слабообводненных участках рудных залежей и должны быть выведены в технологический и/или экономический забаланс

Пример неравномерной обводненности рудной залежи X6 месторождения Хиагдинское

Решение проблемы: использование технологии управления ресурсами подземных вод

Инструмент реализации: создание геофильтрационной модели месторождения

Решаемые задачи

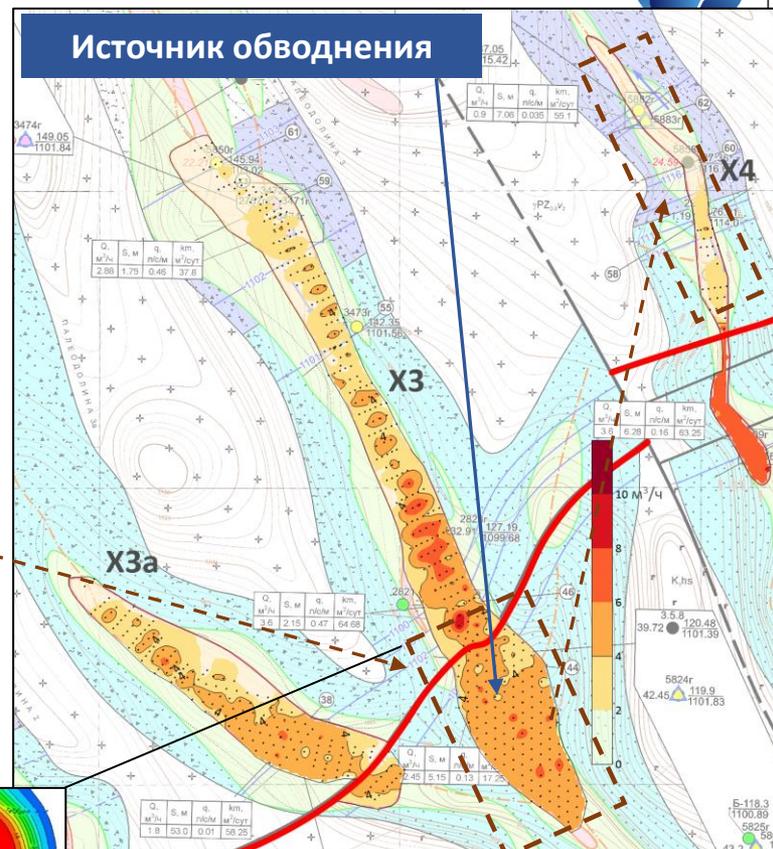
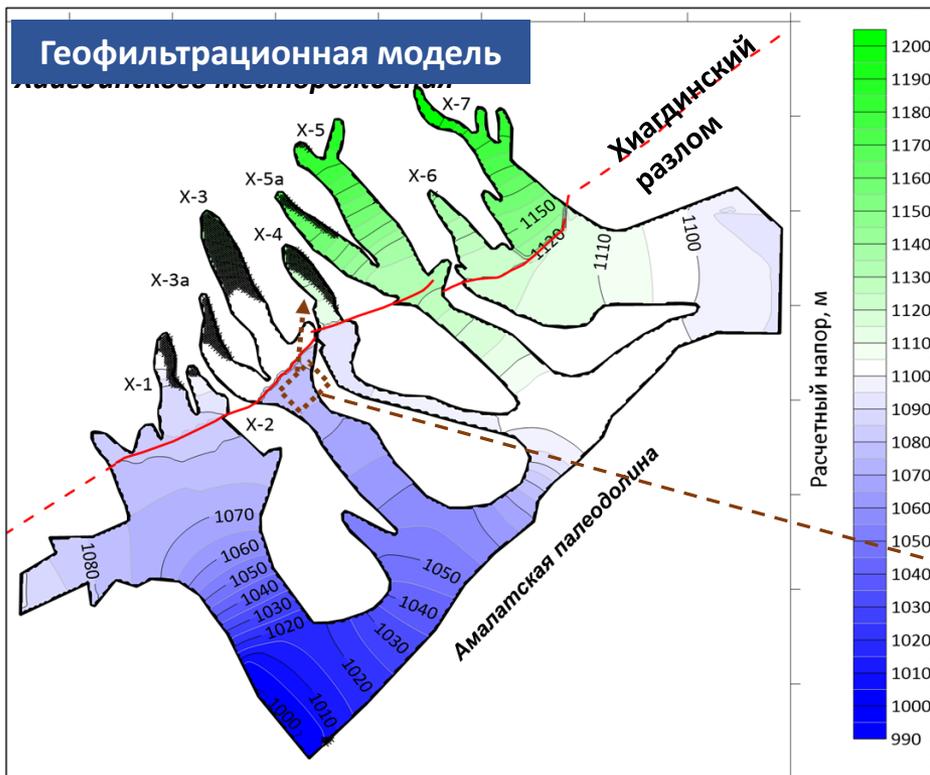
Где взять воду?

В каком объеме?

Куда подавать воду?

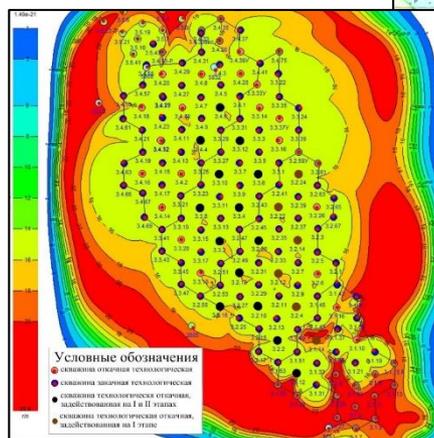
Как долго подавать воду?

Обводнение залежи X4 Хиагдинского месторождения



Рециклинг серной кислоты и окислителя Fe(III)

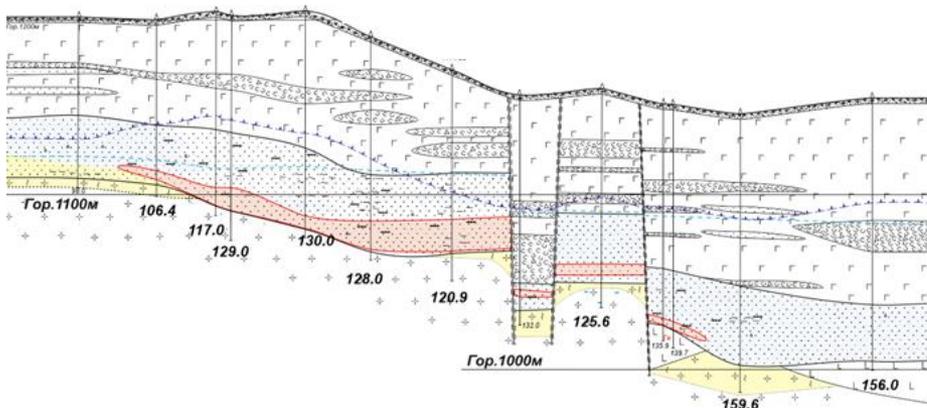
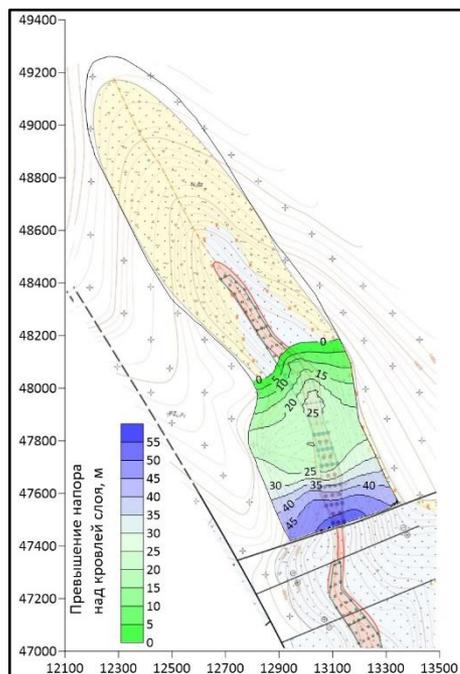
- Остаточная серная кислота в отработанных блоках 3.1 – 3.4
- Содержание Fe(III) в остаточных растворах – 500 мг/л



Обводнение залежи Х4 Хиагдинского месторождения



АРМЗ
РОСАТОМ



Ожидаемый экономический эффект внедрения на залежи Х4 Хиагдинского месторождения:

1. Повышение производительности эксплуатационных ячеек на залежи Х4 до проектного уровня – 4 м³/ч
2. Рециклинг серной кислоты и окислителя Fe(III)
3. Рекультивация нижней части залежи Х3
4. Увеличение МСБ предприятия

Дополнительные инвестиционные затраты	51,35 млн. руб.
Сокращение срока отработки	в 2 раза (с 12 до 6 лет)
Снижение полной себестоимости 1 кг урана	16 %
Срок окупаемости инвестиций	2 года
NPV, 2023-2028	102 млн. руб.



РОСАТОМ
НЕДРА

12. Обоснование экологической безопасности применения скважинного подземного выщелачивания

Преимущества СПВ в сравнении с другими способами разработки урановых месторождений



АРМЗ
РОСАТОМ

1. При СПВ отсутствует добыча руды. Гидрометаллургический процесс – выщелачивание – перенесен в недра земли. Соответственно персонал предприятия не контактирует с радиоактивной рудой
2. Не образуются отвалы пустых пород и забалансовых руд
3. Не образуются хвосты и хвостохранилища гидрометаллургических заводов
4. Радиоактивность сохраняется на месте залегания, т.к. радий остается на месте залегания выщелоченных урановых руд
5. При СПВ не происходит проседания поверхности. Скелет породы сохраняется без изменения. Происходит лишь обеление рудного песка

Рудный песок

До и после
выщелачивания U 80%



- Основной расход серной кислоты приходится на растворение карбонатных и фосфатных минералов и выщелачивание петрогенных элементов из калиевых полевых шпатов, биотита, хлорита, серицита и гидрослюд
- ✓ На растворение рудных минералов расходуется не более 5% серной кислоты



Горные выработки



Отвалы при ПГР



Карьер при ОГР



Основной источник радиоактивности Ra – остается на месте залегания урановых руд. При СПВ на поверхность извлекается не более 5% Ra



APМЗ
РОСАТОМ



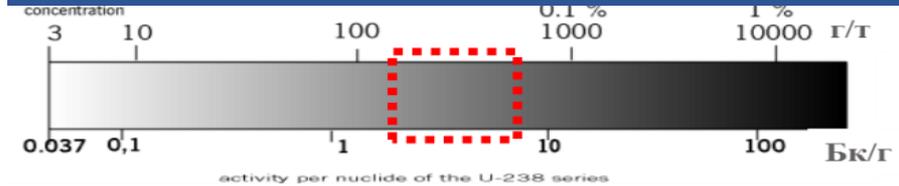
Доказательство сохранения Ra на месте залегания выщелоченных урановых руд



1. Гамма-аномалии, по которым находят урановые руды методом гамма-каротажа, после СПВ сохраняются практически без изменения, так как радий с сульфатом серной кислоты образует труднорастворимое соединение

$$\text{Ra}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} = \text{RaSO}_4 \text{ (тв)}$$
2. RaSO_4 – произведение растворимости которого $\text{PP} = 10^{-11}$
3. В выщелоченных урановых рудах коэффициент радиоактивного Ra-U равновесия достигает 190 отн.ед.

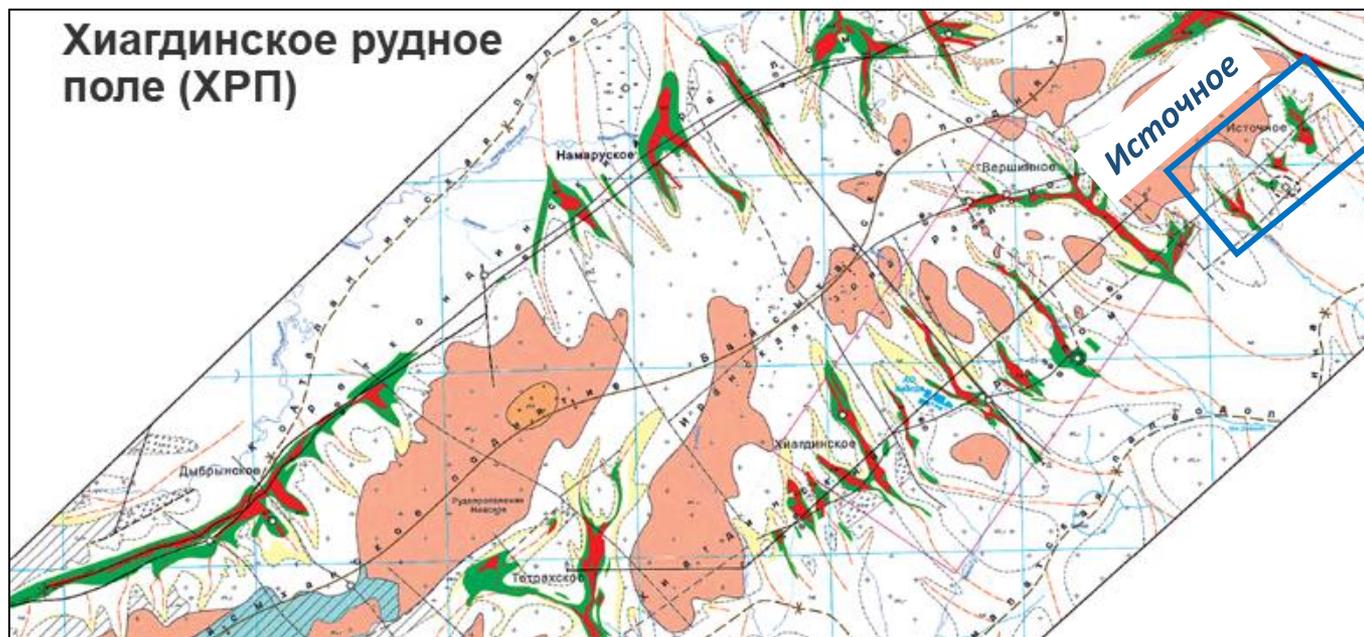
Урановые руды бедные и слаборадиоактивные



Стадийность геоэкологических исследований при СПВ

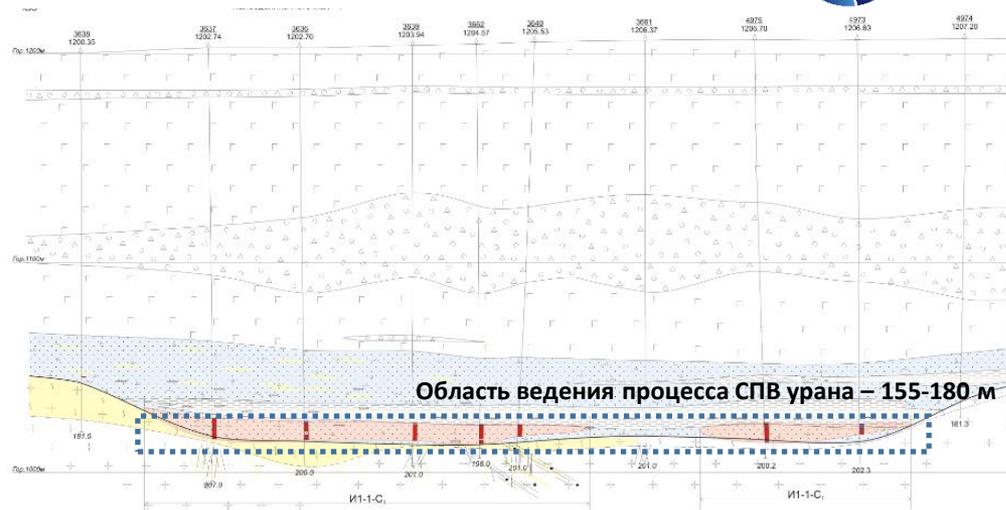
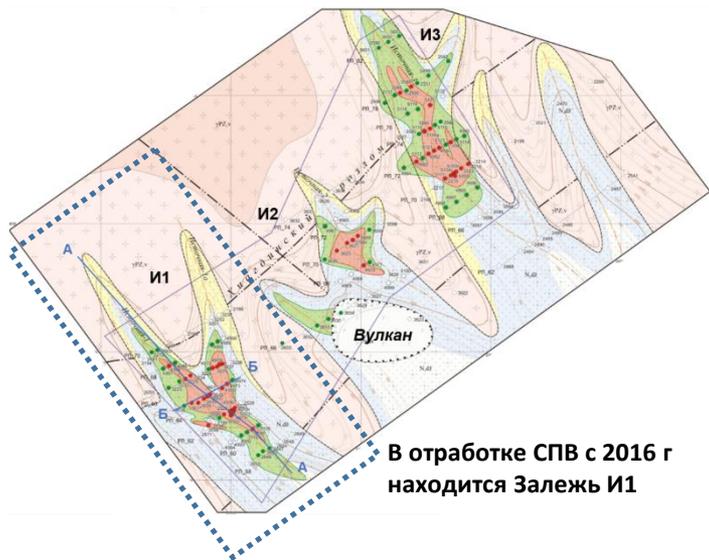
- 1. В период геологоразведочных работ**
- 2. На стадии предпроектных инженерно-экологических изысканий**
- 3. На стадии строительства перерабатывающих установок и полигонов СПВ**
- 4. На стадии отработки полигонов СПВ – экологический мониторинг и геотехнологическое моделирование**
- 5. На стадии ликвидации полигонов СПВ – экологический мониторинг и геоэкологическое моделирование**

Пример проведения экологических исследований на месторождении Источное Хиагдинского рудного поля



- ❑ АО «Хиагда» расположено в Баунтовском эвенкийском районе Республики Бурятия
- ❑ Ближайшие населенные пункты: с.Романовка – 78 км и районный центр п.Багдарин – 110 км
- ❑ Площадь месторождения Источное – 0,378 км²
- ❑ Месторождение от площади Байсыханского поднятия 526 км² занимает $7,2 \cdot 10^{-4}$ часть, а от территории Баунтовского эвенкийского района - 66816 км² - $5,7 \cdot 10^{-6}$.
- ❑ Масштаб техногенного воздействия этого объекта на природную среду административного района - минимален

Природная геофильтрационная защищённость подземных вод от локального подземного источника загрязнения



Химический состав природных подземных вод

Базальтовый водоносный горизонт									
Скважина	Глубина отбора пробы, м	Ед.изм.	Анионы			Катионы			Минерализация
			НСО ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Сl	Ca ²⁺	Mg ²⁺	(Na+K) ⁺	
510г	98	мг/дм ³	85	0	0	8	10	7	109
		мг/дм ³	85	0	0	8	10	21	124
Рудоносный водоносный горизонт									
Скважина	Дата отбора пробы	Ед.изм.	Анионы			Катионы			Минерализация
			НСО ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Сl	Ca ²⁺	Mg ²⁺	(Na+K) ⁺	
4976г	11.06.2009	мг/дм ³	759	10,7	10,6	77	53	93	1003
4977г	26.06.2009	мг/дм ³	665	0	9,9	96	37	79	887
4978г	04.07.2009	мг/дм ³	888	18,9	12,8	92	64	114	1190
	22.08.2009	мг/дм ³	756	14	7,1	8	81	128	994
4979г	05.08.2009	мг/дм ³	700	<2	<5	101	50	5	856
5102г	20.08.2009	мг/дм ³	817	11,3	7,1	63	64	109	1071

- **Природная изолированность базальтового горизонта обеспечена водоупорными свойствами надрудной вулканогенно-осадочной толщей (коэффициент перетока $n \cdot 10^{-4}$ - $n \cdot 10^{-3}$ 1/сут)**
- **Она также подтверждается значительным различием химического состава подземных вод в базальтовом и рудоносном горизонте**

Природная геохимическая защищенность подземных вод от локального подземного источника загрязнения



Трансформация химического состава подземных вод

Элемент	Максимальное содержание, мг/л	Элемент	Максимальное содержание, мг/л
pH	1,5	Микрокомпоненты	
Макрокомпоненты		Y	7,5
SO ₄	22292	La	7,3
Al	1613	Nd	5,4
Fe	815	V	5
Mg	729	Li	4,6
Ca	540	Cr	3,6
NO ₃	500	Ni	2
Na	347	Pr	1,5
NH ₄	150	Gd	0,94
U	112	Dy	0,93
Si	105	Th	0,93
Zn	79	Yb	0,92
P	71	Ti	0,74
K	69	Er	0,74
Mn	18	Sm	0,72
Sr	16	Be	0,65
Cl	15	Rb	0,63
Ce	13	Co	0,34
		Sc	0,32
		Ga	0,32
		Pb	0,25
		Ho	0,21
		Eu	0,14
		Lu	0,14
		Tb	0,13
		Tm	0,13
		Mo	0,07
		Cs	0,07
		Ba	0,05
		Cd	0,03
		I	0,02
		Nb	0,01
		Hg	0,01
		Zr	0,0027

Минерализация техногенных растворов – 27,5 г/л

Минеральный состав рудоносных отложений

Минералы	Содержание, %
Кварц	39,1
Плагиоклаз	19,0
Микроклин	19,8
Мусковит, серицит, гидромусковит	6,6
Обломки вулканических пород и пепловый материал	-
Каолинит, хлорит, цеолит, монтмориллонит	13,6
Дисульфиды Fe (пирит, марказит)	0,5
Фосфаты	0,6
Минералы Ti	0,3
Карбонаты	0,5
Σ	100

➤ В результате сернокислотного воздействия на рудовмещающую литологическую среду слабосоленоватые гидрокарбонатные натриево-магниевые природные подземные воды превращаются в кислые соленые сульфатные железо-алюмо-магниевые

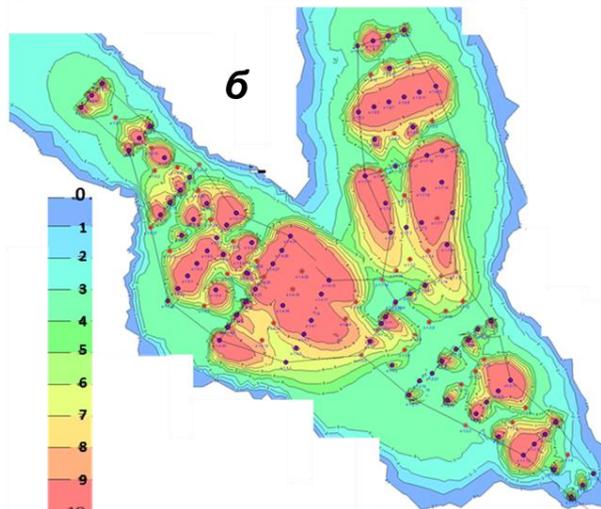
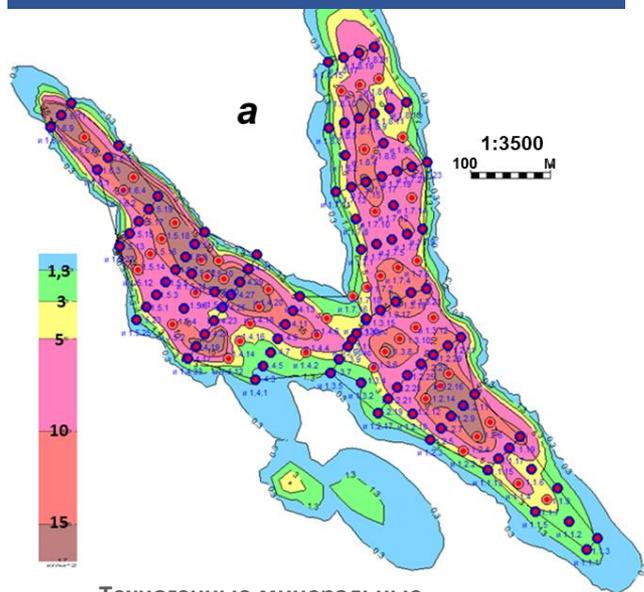
Природная геохимическая защищенность подземных вод от локального подземного источника загрязнения



APMZ
РОСАТОМ

Продуктивность, кг U/m²

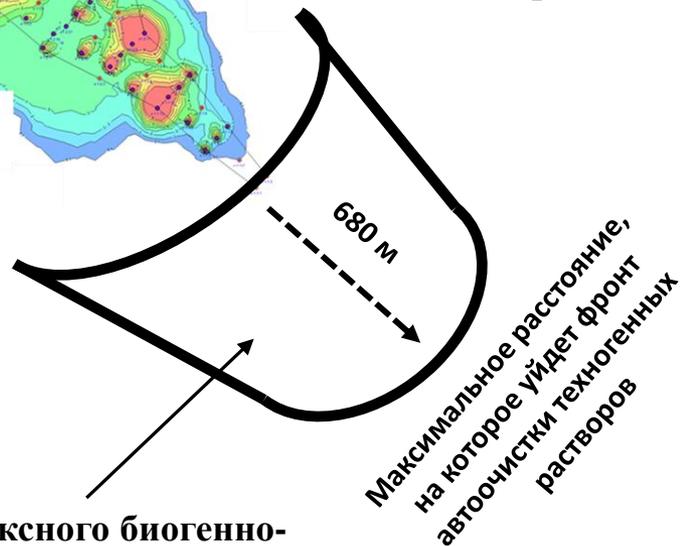
Остаточная серная кислота, г/л



- Защитные геохимические свойства литологической среды – биоактивная естественная подземная микрофлора, нейтрализационная и восстановительная емкость пород

Техногенные минеральные новообразования из зоны барьера

Минерал	Кристаллохимическая формула	Мольный объем, см ³ /моль
Пиккеренгит	$MgAl_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$	461-499
Билинит	$Fe^{2+}Fe^{3+}(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$	461-499
Галотрихит	$Fe^{2+}Al_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$	405-473
Алюоноген	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	-
Алузит	$KAl_3[(OH)_6(SO_4)_2]$	293.6
Ньюберит	$MgHPO_4 \cdot 3H_2O$	159,7
Ярозит	$KFe_3[(SO_4)_2(OH)_6]$	153-171
Гипс	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	74,31
Алузит	$KAl_3[(OH)_6(SO_4)_2]$	46,83
Кальцит	$CaCO_3$	36,9
Гиббсит	$Al(OH)_3$	31,96
Родохрозит	$MnCO_3$	31,08
Аморфный кремнезем	$SiO_2 \cdot nH_2O$	29.0
Ферроксицит	$\alpha-FeOOH$	22.36
Гетит	$\alpha-FeOOH$	20.82



- Ширина зоны комплексного биогенно-восстановительно-нейтрализационного геохимического барьера – 680-800 м
- Продолжительность автоочистки – 50 лет

Принципы обращения с остаточными сернокислыми растворами СПВ урана



1. **Природные подземные воды на урановых месторождениях Источное изначально загрязнены продуктами радиоактивного распада и стабильными элементами спутниками урана, а также имеют повышенное содержание растворенных солей – 1 г/л и не пригодны для питьевого, хозяйственного и технического водоснабжения**
2. **Базальтовый водоносный горизонт, залегающий выше рудоносного водоносного горизонта надежно природно изолирован водоупорными озерно-болотными отложениями**
3. **Надежность изоляции вышележащего водоносного горизонта при его вскрытии технологическими скважинами обеспечена надежной конструкцией скважин**
4. **Низкая скорость движения подземных вод в рудоносном горизонте исключает распространение остаточных сернокислых растворов на большие расстояния**
5. **Остаточные сернокислые растворы, повторяющие контуры рудных залежей, относятся к маломасштабным (локальным) геоэкологическим системам**
6. **Автоочистка линз остаточных растворов под действием защитных геохимических свойств геологической среды начинается с момента прекращения СПВ, протекает внутри линз и при их смещении естественным потоком подземных вод в область техногенно неизмененных осадочных пород**
7. **Глубина, масштабы и продолжительность автоочистки растворов оцениваются методом экологического мониторинга подземных вод в наблюдательных скважинах и методами компьютерного геоэкологического моделирования**
8. **Очитка остаточных растворов от искусственных и петрогенных техногенных веществ на поверхности земли методами химической технологии приведет к масштабному загрязнению дневной поверхности.**



РОСАТОМ
НЕДРА

13. Экономическая эффективность

Ключевые показатели выполненной работы



АРМЗ
РОСАТОМ

Затраты на НИОКР и ТР

Период 2015-2024 гг	Затраты млн.руб.
АО «Хиагда»	356

Результаты интеллектуальной деятельности

РИД	Итого, шт.
Патент на изобретение	5
Патент на полезную модель	1
Свидетельство на ЭВМ	18
Монографии	7
Статьи в рецензируемых журналах	72
Доклады на научных конференциях	34

Экономическая эффективность

Технология	Достигнутый экономический эффект, млн.руб
1. Оптимизация регулярных схем вскрытия рудных залежей скважинами	145
2. Нерегулярные схемы вскрытия рудных залежей (один эксплуатационный блок)	2176
3. Новая конструкция скважин	359
4. Искусственные окислители	456
5. Технологии восстановления производительности технологических скважин	217
6. Каротаж нейтронов мгновенного деления (КНД-М)	301
7. Снижение влияния углекислых подземных вод на эффективность отработки рудных залежей	1420
Итого	3654

Спасибо за внимание

Солодов Игорь Николаевич

Директор программ инновационного и технологического развития
APM3

22.04.2025